

Universidade Federal do Rio de Janeiro

ANÁLISE ESTRUTURAL DE MANIFOLDS EM
CONDIÇÃO DE IÇAMENTO

LUIZ FELIPE S. G. DE CARVALHO

2013



**Universidade Federal
do Rio de Janeiro**
Escola Politécnica

ANÁLISE ESTRUTURAL DE MANIFOLDS EM CONDIÇÃO DE IÇAMENTO

Luiz Felipe S. G. de Carvalho

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Naval e Oceânico.

Orientador(es): Murilo Augusto Vaz

Mario Luis Pires Gonçalves Ribeiro

Rio de Janeiro

Agosto de 2013

ANÁLISE ESTRUTURAL DE MANIFOLDS EM CONDIÇÃO DE IÇAMENTO

Luiz Felipe Salomon Guaycuru de Carvalho

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL E OCEÂNICA DA ESCOLA
POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO
DO GRAU DE ENGENHEIRO NAVAL E OCEÂNICO.

Examinada por:

Prof. Murilo Augusto Vaz, D.Sc.

Eng. Mario Luis Pires Gonçalves Ribeiro, D.Sc.

Prof.^a Marta Cecilia Tapia Reyes, D.Sc.

Prof. Julio Cesar Ramalho Cyrino, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

AGOSTO de 2013

Carvalho, Luiz Felipe Salomon Guaycuru de

Análise Estrutural de Manifolds em Condição de Içamento/Luiz Felipe Salomon Guaycuru de Carvalho – Rio de Janeiro: UFRJ/ESCOLA POLITÉCNICA, 2013.

xi, 47p.: il.; 29,7 cm.

Orientador(es): Murilo Augusto Vaz, Mario Luis Pires Gonçalves Ribeiro

Projeto de Graduação – UFRJ/ POLI/ Engenharia Naval e Oceânica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 58.

1. Análise Estrutural 2. Equipamento Submarino. 3. Elementos Finitos 4. Otimização.

I. Augusto Vaz, Murilo. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Naval e Oceânica. III. Título.

À minha família.

Agradecimentos

Ao professor Murilo Augusto Vaz, que me orientou com atenção e firmeza e acreditou no meu potencial desde o início do curso;

Ao Engenheiro Mario Ribeiro, pela grande ajuda, sem a qual este trabalho não poderia ter se concretizado;

Aos demais professores do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica pelas milhares de elucidações ao longo da minha trajetória como aluno;

Ao amigo Mario Guttemberg, pelo incentivo e pela oportunidade que originou este trabalho;

Aos colegas de faculdade e, de agora em diante, de profissão, pelos momentos de alegria e companheirismo sem igual, dentro e fora do Fundão;

Aos companheiros de borda de piscina, no compartilhamento das dores e glórias nos piores e melhores momentos, e pela compreensão;

Aos meus pais, André e Vânia pelo amor, carinho e incentivo incomensuráveis desde o mais tenro começo;

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Naval e Oceânico.

Análise Estrutural de Manifolds em Condição de Içamento

Luiz Felipe Salomon Guaycuru de Carvalho

Agosto/2013

Orientador(es): Murilo Augusto Vaz

Mario Luis Pires Gonçalves Ribeiro

Curso: Engenharia Naval e Oceânica

Esta pesquisa compara dois métodos de análise estrutural, WSD e LRFD (*Load and Resistance Factor Design* e *Working Stress Design*, da sigla em inglês, respectivamente), comumente adotados na indústria *offshore*, através da modelagem de um equipamento submarino conhecido como Manifold. Um procedimento de otimização dimensional da estrutura do equipamento também é formulado através de exemplos de vigas simples biapoiadas, e conceitualmente extrapolados para o objeto de projeto.

Os resultados ilustram a comparação entre a aplicação dos dois métodos, a partir do ponto de vista da indústria, e o esforço necessário para reduzir a quantidade de material e, portanto, o custo final da produção deste tipo de equipamento.

Palavras-chave: Manifold, LRFD, WSD, Otimização, Elementos Finitos.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

Manifold Structural Analysis in a Lifting Condition

Luiz Felipe Salomon Guaycuru de Carvalho

August/2013

Advisor: Murilo Augusto Vaz

Mario Luis Pires Gonçalves Ribeiro

Course: Naval and Ocean Engineering

This research compares two methods of structural analysis, the LRFD and WSD (Load and Resistance Factor Design and Working Stress Design), commonly adopted in the *offshore* industry, through the modeling of a subsea equipment known as *Manifold*. A structural dimensional optimization procedure of the equipment is also formulated through simple beam examples and conceptually extrapolated to the project object.

The results illustrate the comparison of the applicability of the two methods, from the industry point of view, and the effort required to reduce the amount of material and therefore the final cost.

Keywords: Manifold, LRFD, WSD, Optimization, Finite Elements.

Sumário

Lista de Símbolos	xi
1. Introdução	12
1.1. Revisão Bibliográfica	13
1.2. O Método de Elementos Finitos	15
1.2.1. Análise por Elementos Finitos	15
1.3. Manifold	16
1.3.1. Desvantagens do Uso do Manifold	18
1.3.2. Da Topologia Estrutural	18
1.3.2.1. Base	19
1.3.2.2. Sub-Base	19
1.3.2.3. Módulo Recuperável	20
1.3.2.4. Módulo de Conexão Vertical	20
1.3.3. Condição Crítica e Instalação do Equipamento	21
1.4. Modelo Adotado	21
2. Metodologia	22
2.1. Modelo	23
2.2. Malha	25
2.3. Içamento	26
2.4. Condições de Contorno	27
2.5. Carregamentos	28
3. Os Métodos LRFD e WSD	31
3.1. Do Projeto de Estruturas de Aço em Geral	31
3.2. Da Aplicabilidade	32
3.3. LRFD	32
3.4. WSD	33
3.5. Da Comparação Entre os Métodos	34
3.6. Estados Limite	35
3.7. Carregamentos, Fatores de Carregamentos e Combinação de Carregamentos ..	35
3.8. Consideração Sobre o Projeto	37

3.9.	Análise Focada no Modelo.....	37
3.10.	Da Teoria de Modelação	39
3.10.1.	LRFD em Viga Simples Biapoiada	39
3.10.2.	WSD em Viga Simples Biapoiada.....	43
4.	Otimização	44
4.1.	Conceitos Básicos	44
4.2.	Considerações do Modelo	45
4.3.	Exemplo Simples.....	45
4.3.1.	Parametrização.....	47
4.3.2.	Geração do Loop de Otimização	48
4.3.3.	Definição de Variáveis e Tolerâncias	49
4.3.4.	Definição do Método de Otimização.....	51
4.3.5.	Resultados do Exemplo Proposto	52
5.	Resultados	52
5.1.	Primeira Iteração	53
5.2.	Segunda Iteração	54
5.3.	Validação do Modelo e Aplicação dos Métodos LRFD e WSD.....	55
5.3.1.	LRFD	55
5.3.2.	WSD	56
5.3.3.	Da Comparação	56
6.	Conclusão.....	56
7.	Referências Bibliográficas	58
	Anexos	59
	Anexo A - Arquivo Input de Carregamento	59
	Anexo B – Tabela de Bitolas	61
	Anexo C - Arquivo log para o loop de Otimização:	62

Lista de Símbolos

$F \rightarrow$ Força, em N;

$F_d \rightarrow$ Carregamento de projeto, em N (LRFD);

$F_k \rightarrow$ Carregamento característico, em N (LRFD);

$h \rightarrow$ Altura da viga, em metros;

$I \rightarrow$ Momento de inércia da viga, em m^4 ;

$L \rightarrow$ Comprimento da viga exemplo, em metros;

$R_d \rightarrow$ Solicitação de projeto, em N/m² (LRFD);

$R_n \rightarrow$ Solicitação nominal, em N ou N/m² (LRFD);

$R_u \rightarrow$ Solicitação requerida, em N ou N/m² (LRFD);

$S_d \rightarrow$ Efeito de carregamento combinado mais desfavorável, em N/m² (LRFD);

$S_k \rightarrow$ Efeito do carregamento característico, em N/m² (LRFD);

$Y \rightarrow$ Altura da linha neutra da viga, em metros;

$\beta \rightarrow$ Coeficiente de estrutura (WSD);

$\gamma_f \rightarrow$ Fator do carregamento (LRFD);

$\gamma_m \rightarrow$ Fator do material (LRFD);

$\eta_0 \rightarrow$ Fator de uso básico (WSD);

$\eta_p \rightarrow$ Fator de uso máximo permissível (WSD);

$\sigma \rightarrow$ Tensão de escoamento, requerida, em N/m²;

$\sigma_{adm} \rightarrow$ Tensão admissível, em N/m² (WSD);

$\sigma_{calc} \rightarrow$ Tensão calculada, em N/m² (WSD);

$\sigma_{esc} \rightarrow$ Tensão de escoamento, em N/m² (WSD);

$\phi \rightarrow$ Fator de resistência global (LRFD);

$\Omega \rightarrow$ Fator de segurança global(WSD);

1. Introdução

A indústria utiliza hoje dois tipos de método para cálculo de tensões e avaliação de condições estruturais de equipamentos (dos mais variados tipos). São eles o LRFD (*Load and Resistance Factor Design*) e o WSD (*Working Stress Design*). De naturezas muito semelhantes, estas abordagens são praticadas em diferentes empresas do ramo, e adotadas na forma que melhor lhes convém, a depender do objetivo, dados disponíveis e níveis de segurança exigidos. De acordo com Charles (2013), em 1995 a diretoria da AISC, *American Institute of Steel Construction* (Instituto Americano de Construção em Aço), reafirmou seu compromisso de tornar o mais moderno destes métodos, o LRFD, a principal especificação na fabricação de estruturas de aço na indústria. No entanto, ainda nos dias de hoje vê-se muito do método WSD, praticado desde os anos 20 do século passado, em uso na indústria *offshore*. Estes métodos são então aqui explicados frente a exemplos simples e em seguida aplicados a um modelo de *Manifold*, equipamento submarino de interligação de dutos, através do qual um fluido ou gás passa, ou é manobrado, para se concentrar num mesmo coletor. Este equipamento, muito usado na indústria, é inserido neste trabalho como *input* para todas as considerações feitas a respeito do objeto e seu comportamento.

O presente trabalho trata da análise estrutural, via modelação em software de elementos finitos (FEM), de um *Manifold*.

À medida que a indústria *offshore* se desenvolve, cada vez mais poços são explorados. Para aperfeiçoar a organização de todos os sistemas *downstream*, faz-se necessário o uso dos chamados equipamentos submarinos de interligação de dutos, que nada mais são que dispositivos instalados no leito marinho destinados a receber dutos provenientes dos diversos poços e concentrar a produção em uma única linha ou em um único terminal. Este arranjo contribui, por sua vez, para a redução dos custos de manutenção de linhas, redução do tempo de transporte do óleo até a unidade de produção, e para a evidente organização que se segue à sua implementação, podendo, inclusive, contribuir para a antecipação do primeiro óleo em poços recém-descobertos.

São equipamentos submarinos de interligação de dutos os Manifolds, PLEM's (*Pipeline End Manifold*), PLET's (*Pipeline End Termination*), e ILT's (*In Line Tee*), como se vê na

figura 1, (montagem extraída de [Ref. <http://www.google.com>](http://www.google.com), acesso em 1 de Ago de 2013, 22:36:00).



FIGURA 1 - DA ESQUERDA PARA A DIREITA A PARTIR DO TOPO: PLEM, PLET E ILT.

Para o procedimento de análise aqui desenvolvido, optou-se pela modelação de um *Manifold*, por conta da maior disponibilidade de dados por ser um elemento estrutural mais complexo.

É um equipamento pequeno, de função principalmente organizacional, que faz parte da linha, composta por dutos rígidos e flexíveis, risers e flowlines, e que possui diversas características que serão esmiuçadas neste trabalho e, para tanto, serão propostas algumas condições de contorno adiante que permitam a extrapolação dos efeitos mais consistentes do equipamento real para o modelo, de forma que os resultados sejam propriamente analisados.

1.1. Revisão Bibliográfica

Num contexto de projeto naval, mais especificamente de equipamentos, deve-se seguir normas para o correto cálculo estrutural do mesmo. No presente caso, no entanto, apesar de tratar-se de meio submarino, muitas das condutas adotadas como práticas de projeto baseiam-se em normas internacionais voltadas para dimensionamento de estruturas da área civil, e a compreensão do contexto em que as normas foram compostas foi extraída de Charles (2013). Já o *Steel Construction Manual* (AISC, 2006), fornece a norma a partir da

qual muitas das considerações de cálculo foram aqui utilizadas. O *Manifold*, bem como muitos dos demais equipamentos submarinos, foi de fato, por muito tempo, tratado como produto estrutural baseado no cálculo de estruturas civis. No presente trabalho, o *Steel Construction Manual* (AISC, 2006) foi de extrema importância para a compreensão de muitas das considerações apresentadas por *Design of Offshore Steel Structures, General LRFD Method* (DNV, 2011) e *Design of Offshore Steel Structures, General WSD Method* (DNV, 2011), regras mais modernas de Sociedade Classificadora, DNV, voltada para as diferentes abordagens que se seguiram a partir da evolução na forma de cálculo desse tipo de estrutura, para dois tipos distintos, *Load and Resistance Factor Design* (LRFD) e *Working Stress Design* (WSD), respectivamente, tal como exposto neste trabalho.

As regras adotadas pela DNV, em *Rules for Planning and Execution of Marine Operations* (DNV, 1996) forneceram os coeficientes úteis para o dimensionamento e correta extrapolação dos dados de *input* de carregamento e restrição aplicáveis à estrutura para esta análise. Como se trata de um equipamento sujeito a intempéries e fenômenos naturais os mais diversos, em ambiente inóspito como o fundo do mar, os carregamentos considerados devem levar em consideração amplificações de perturbação capazes de englobar quaisquer situações extremas encontradas no meio de instalação do equipamento, de forma a protegê-lo contra falhas devido às solicitações advindas de tais condições. Estes coeficientes, por sua vez, podem ser encontrados explanados no arquivo de *input* de carregamento no anexo A deste relatório.

Já Beer e Johnston (1995) auxiliaram na formulação matemática simples explorada para apresentar a mecânica por detrás da teoria apresentada em cada um dos métodos de cálculo estrutural do equipamento, LRFD e WSD, nas aplicações para as vigas simples tomadas como exemplo.

Já para a construção do raciocínio que balizou o método de Elementos Finitos adotado nesta pesquisa, utilizou-se de Hutton (2004), que apresenta a teoria esmiuçada acerca dos pormenores que acompanham o cálculo por discretização de elementos para estruturas complexas.

Lai (2009) expôs, em sua dissertação, a anatomia do equipamento aqui adotado para a análise estrutural, apresentando com detalhes todos os componentes de uma estrutura desta

natureza, conforme exposto na introdução desta pesquisa, voltada para os fins também apresentados pelo autor desta referência.

Conforme Ribeiro (2008) é conceituar e classificar por ordem de complexidade, todo o procedimento de lançamento de um *Manifold* tal qual exposto aqui, o que permite, portanto, eleger a condição mais crítica de operação, viabilizando toda a análise conduzida nesta pesquisa.

Por fim, com o detalhamento dos tipos de otimização explanados por Cordeiro (2007), pôde-se desenvolver um procedimento adequado à análise final deste trabalho.

1.2. O Método de Elementos Finitos

1.2.1. Análise por Elementos Finitos

Elementos Finitos (*Finite Elements*, em inglês) é o processo que consiste em discretizar um corpo em elementos menores, pequenos o suficiente para reagir sob solicitações, no caso, estruturais, sobre o qual são válidas todas as formulações pertinentes ao âmbito da estática, interagindo entre si. Trata-se de um método numérico, aplicado a casos em que soluções analíticas são demasiadas complexas para serem aplicáveis, como no caso de elementos de geometria, carregamento ou tipo de material não usual.

De acordo com Hutton (2004), o método de elementos finitos é uma técnica computacional usada para obter apenas soluções aproximadas para um determinado problema, a partir de valores de contorno. O problema de valor de contorno é, por sua vez, um problema matemático em que uma ou mais variáveis dependentes devem satisfazer uma equação diferencial em todos os pontos de um domínio de variáveis independentes conhecidas, e satisfazer condições específicas do contorno desse domínio. Trata-se, segundo o autor, de um método muito eficiente para se obter soluções aproximadas com uma boa acurácia.

No caso do presente trabalho, esta técnica aplica-se a elementos estruturais que, apesar de apresentarem geometria receptível ao tratamento analítico, compõem, num conjunto, um elemento global difícil de ser analisado, por conter um grande número de graus de liberdade e de carregamentos.

Portanto, é utilizado este método, em que equações são formuladas de tal forma que, nas ligações nodais, ou seja, entre elementos, o valor da variável dependente em qualquer

dessas conexões é o mesmo para cada elemento conectado a um mesmo nó. Assim, a continuidade estrutural é mantida e garantida. De fato, a formulação do método é tal que garante, por si só a continuidade da variável dependente através das fronteiras entre os elementos da malha. Caso contrário, o método não pode ser aplicado. Esse recurso evita a impossibilidade física de haver lacunas ou falhas no domínio do problema.

O processo de representação de elementos físicos de um domínio com elementos finitos é referido como **malha**. Quanto mais refinada for esta malha, mais preciso será o resultado do processo. Se a interpolação de funções satisfizer certos requerimentos matemáticos inerentes à resolução, a solução em elementos finitos para um problema em particular converge para a solução exata (não conhecida) deste problema.

1.3. Manifold

Manifold é o termo empregado para definir o equipamento submarino que concentra ou descentraliza ramais de distribuição de óleo resultante da produção *offshore* e fluidos essenciais à operação dos equipamentos submarinos envolvidos nas operações de *downstream*.

Este equipamento, rígido e instalado no solo marinho, é responsável pela otimização do arranjo submarino e por um considerável aumento na produtividade de unidades de exploração, já que este permite a diminuição do número de linhas e o consequente aumento da capacidade de controle, produção ou injeção em cada uma das linhas a ele conectada, segundo Lai (2009).

Manifolds são ainda, segundo Ribeiro (2008), importantes na redução da carga de catenárias sobre as unidades flutuantes, ou seja, reduz o peso dos muitos dutos que ligariam a plataforma até a cabeça de poços, uma vez que concentra em poucas linhas a produção advinda de demais dutos submarinos. Em um cenário de expansão da produção *offshore* para águas profundas e ultra profundas, fatores como carregamento proveniente de equipamentos submarinos atuando diretamente sobre as unidades flutuantes, passam a ser críticos e por isso a utilização de *Manifolds* no arranjo submarino ganha uma dimensão ainda maior.

Além disso, esses equipamentos constituem uma redução nos custos de equipamentos ao reduzir o número de dutos flexíveis a serem instalados, especialmente, mais uma vez,

quando se trata de lâminas d'água com mais de dois mil metros, onde estas linhas tomam proporções muito grandes.

É dotado de um conjunto de equipamentos, válvulas de controle em sua maior parte, e ao menos uma que permita que a linha seja instalada vazia e possibilite futuras intervenções no trecho (especificamente o Módulo de Conexão Vertical, como definido mais adiante nesta pesquisa). Além disso, o *Manifold* tem capacidade de absorver deslocamentos horizontais causados pelas dilatações térmicas a que a linha esteja sujeita durante a operação, justamente por apresentar comportamento mais robusto que o de linhas propriamente ditas.

É também através da utilização dessas ferramentas que se torna possível antecipar a produção de poços, fazendo a interligação destes até o *Manifold* instalado antes mesmo da chegada de qualquer unidade de exploração.

Existem diferentes tipos de *Manifold*. Alguns podem, inclusive, desempenhar mais de uma função.

- *Manifold de Produção* - típico *manifold* que concentra em dois ou três *risers* a produção advinda de seis a oito cabeças de poço.
- *Manifold de Injeção* - Com a mesma configuração de um *Manifold de Produção*, este equipamento pode promover o estímulo, através de gás lift ou água, em até oito poços simultaneamente.
- *Manifold de Controle* - Permite controlar válvulas de diversos equipamentos submarinos a ele conectado e até mesmo adquirir e transmitir sinais de sensores a partir da unidade *offshore*.

A figura 2 apresenta algumas imagens de arranjos de produção submarina retiradas de Lai (2009).

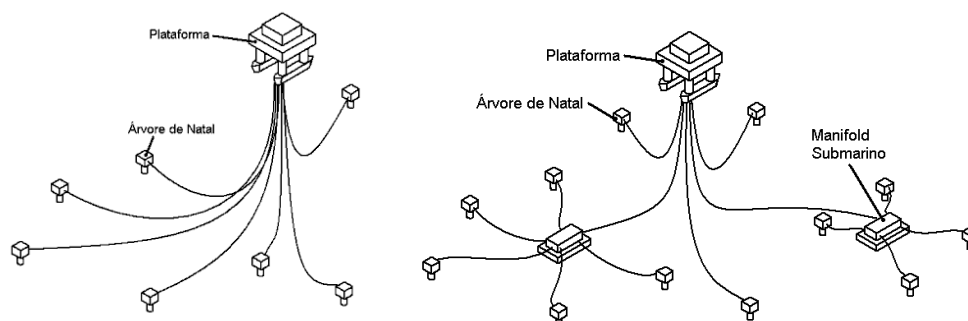


FIGURA 2 - COMPARAÇÃO ENTRE UM CAMPO COM INSTALAÇÃO CONVENCIONAL E OUTRO COM UTILIZAÇÃO DE *MANIFOLDS*.

1.3.1. Desvantagens do Uso do Manifold

Apesar de estar inserido em um contexto propício à sua utilização, principalmente no que diz respeito ao aumento na complexidade dos arranjos submarinos, o *Manifold* apresenta também algumas desvantagens que devem ser aqui apresentadas em caráter expositivo.

Em um ambiente de baixas temperaturas e altas pressões, com a água em contato com óleo cru, gás natural ou hidrocarbonetos leves no estado líquido de uma forma geral, ocorre a formação de hidratos, um problema conhecido da indústria *offshore*, segundo Haghghi, Howboldt, Cai (2013). O *Manifold*, por concentrar em uma estrutura complexa esse ambiente, torna o cenário mais propício à formação desses hidratos.

Além disso, por ser um equipamento sofisticado e de elevado custo, encarece todo o processo logístico, e em especial o processo de instalação, que demanda alta qualificação dos equipamentos que conduzirão o procedimento e um alto nível de planejamento.

1.3.2. Da Topologia Estrutural

O *Manifold* pode ser caracterizado, segundo o conceito Petrobrás, por possuir quatro partes fundamentais, como apresentado por Lai (2009). São elas a **Base**, a **Sub-Base**, o **Módulo Recuperável** e o **Módulo de Conexão Vertical**, que serão descritos a seguir, além das tubulações, válvulas, mandris e conexões que o integram aos demais equipamentos componentes do arranjo submarino.

1.3.2.1. Base

A Base é a estrutura do equipamento que permanece instalada durante toda a vida útil do *Manifold*. É nesta estrutura que se encontram os olhais de fixação e manuseio, e o quadro de vigas que é responsável pela sustentação do carregamento dos sistemas instalados no *Manifold*, como válvulas e acessórios para recepção e conexão dos dutos. É a Base, a parte responsável também por receber e dissipar a maior parte do carregamento proveniente das operações desempenhadas pelo equipamento, tais como o içamento e a expansão térmica devido à passagem dos fluidos de produção.

A Base deve atender a alguns requisitos mínimos, o que significa que seu projeto deve ser otimizado, de forma a estabelecer dimensões suficientes para receber todos os equipamentos componentes do *Manifold*, abrigar as vigas calculadas de modo a suportar os carregamentos destes equipamentos e das operações desempenhadas pelo *Manifold*, e ainda promover a total estabilidade do equipamento em quaisquer situações a que este esteja adequado a desempenhar.

1.3.2.2. Sub-Base

A Sub-Base é responsável por suportar a Base e o restante do *Manifold* durante toda a sua vida útil. É este módulo que afixa de fato o equipamento ao solo marinho, afixando toda a estrutura, através de fundações.

Sua conexão com o equipamento em si pode ser feita através de um módulo de acoplamento, que permita a desconexão, ou mesmo fixa, através de estojos ou solda.

A Sub-Base é também composta por um quadro de vigas dimensionada de acordo com o carregamento a que deve suportar, e também por uma possível “saia”, que nada mais é do que uma caixa invertida formada por chapas que aumentam a resistência no apoio do solo com o equipamento, melhorando assim a fundação e, consequentemente a estabilidade e a capacidade do equipamento de resistir aos esforços a que esteja submetido.

A existência de uma Sub-Base componente do equipamento é desejável do ponto de vista de facilitar a instalação e uma eventual desinstalação do equipamento, uma vez que esta promove uma melhor penetração no solo ao mesmo tempo em que garante a desconexão do *Manifold*, abandonando a Sub-Base na posição e facilitando a retirada do

restante do equipamento, uma vez que não existiria a carga de sucção que seria acrescida pelo contato direto com o solo.

Tanto a Base quanto a Sub-Base devem ter, em termos estruturais, dimensões próximas.

Na análise considerada, a Sub-Base é apenas considerada em termos de efeito no que diz respeito à não deflexão do equipamento. O engaste com o solo, portanto, será desconsiderado.

1.3.2.3. Módulo Recuperável

Trata-se de um módulo composto por estrutura, conector, dispositivo de içamento e demais componentes, maior custo de todo o equipamento, e que pode ser recuperado sem a necessidade de se trazer todo o *Manifold* para a superfície, ou seja, é um módulo independente, que pode ser totalmente desacoplado. Esta capacidade de desacoplar equipamentos primordiais ao funcionamento do *Manifold* de forma rápida garante que o equipamento permaneça em funcionamento durante toda sua vida útil, quase sem interrupções, salvo operações de troca e manutenção destes elementos, que, graças a este sistema de recuperação, ocorre de forma rápida.

Devido ao Módulo Recuperável ser composto de uma grande diversidade de elementos de peso substancial no *Manifold*, o centro de gravidade geral do mesmo fica, muitas vezes, deslocado da posição de simetria, comprometendo, em algum nível, a eficácia das fundações. Esta situação caracteriza-se por ser, portanto, uma das condições críticas de carregamento no equipamento para determinação da fundação, e deve ser levada em consideração quando das análises estruturais, porém não tratada nesta pesquisa.

1.3.2.4. Módulo de Conexão Vertical

Não se trata de um componente do equipamento em si, mas da linha de produção que promove a ligação entre o *Manifold* e a plataforma ou entre o *Manifold* e a *Árvore de Natal*. Neste contexto, este elemento não será levado em consideração em termos estruturais, mas o carregamento proveniente de sua operação se fará presente, tal qual numa estrutura real. Mais especificamente, o peso agregado é relativo ao *hub* do módulo apenas, uma vez que o *Manifold* é instalado sem o(s) Módulo(s) de Conexão Vertical.

1.3.3. Condição Crítica e Instalação do Equipamento

A instalação do *Manifold* é composta por cinco etapas, podendo ser distinguidas entre Içamento, Descida, Orientação, Assentamento Final e Inspeção Submarina, de uma forma geral. O Içamento é tratado aqui como condição crítica de operação a ser considerada nas análises promovidas para o dimensionamento da sua estrutura. Durante esta operação, o equipamento está sujeito a todo o seu peso próprio, concentrado, no caso estudado, em quatro pontos de conexão através de lingadas de cabo de aço convergidas para um ponto fixo de içamento, no caso o bloco do guindaste de içamento utilizado na operação. Esta etapa tem por finalidade realizar a operação de *overboarding* do *Manifold*, e descê-lo até a linha d'água, ponto em que se iniciará a etapa de descida até o leito do marinho e sua instalação, sob condições totalmente diferentes.

O Içamento pode dar-se ainda através de conexão das lingadas a ferramentas de manuseio ou ainda de uma coluna rígida ligada a uma ferramenta de manuseio. Estas opções, porém, ficam descartadas para a análise do modelo aqui considerado.

1.4. Modelo Adotado

O modelo fornecido, apresentado na figura 3 em linhas, utilizado como base para a geometria e distribuição de elementos e pontos de içamento, consiste em um *Manifold* simplificado, eliminados elementos de produção, fundação, operação e de instalação, bem como detalhes construtivos pouco relevantes como contraventamentos de chapas e pequenos reforços estruturais, sendo composto apenas por seus principais elementos, fundamentais para a análise em elementos finitos, de forma a produzir resultados suficientemente consistentes com a realidade para sustentar as conclusões aqui obtidas.

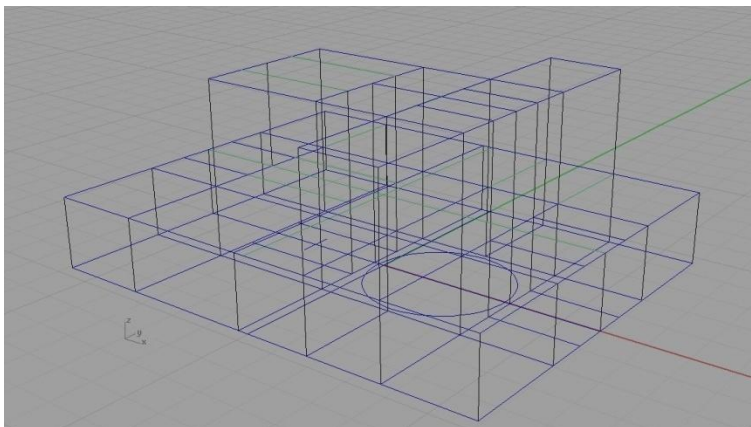


FIGURA 3 - MODELO EM EXTENSÃO IGES.

Seguindo a topologia estrutural explanada anteriormente, podem-se definir as dimensões básicas do equipamento usado para análise, apresentadas na tabela 1.

TABELA 1 - DIMENSÕES E NÚMERO DE ELEMENTOS DO *MANIFOLD*.

Dimensões Principais - <i>Manifold</i>					
	Base	Sub-Base	Módulo Recuperável	Lingada	Total
Comprimento [m]	11,811	X	7,224	x	11,811
Largura [m]	9,3		9,3	x	9,3
Altura [m]	1,811		2,657	5.679	10,147
Número de Elementos	94		37	4	135

2. Metodologia

A execução do projeto consiste na modelação de um equipamento submarino simplificado, mas que atenda às conformidades estruturais básicas exigidas para um *Manifold* industrial. Em geral conduz-se a análise frente a pelo menos oito casos de carregamento combinado, como é feito na indústria. Aqui, para efeitos de simplificação, optou-se por realizar a modelação com apenas um desses casos, mais aproximado da condição real de operação.

2.1. Modelo

Foi obtida na indústria, como dado de entrada, a geometria básica que permitiu o início dos estudos no sentido de gerar a estrutura primordial. O modelo é tal como apresentado na figura 4.

É importante lembrar que apesar de este relatório utilizar unidades do Sistema Internacional, as unidades utilizadas no modelo seguem o sistema imperial de unidades, uma vez que o modelo base adotado trouxe tais convenções, exigindo algum esforço de conversão.

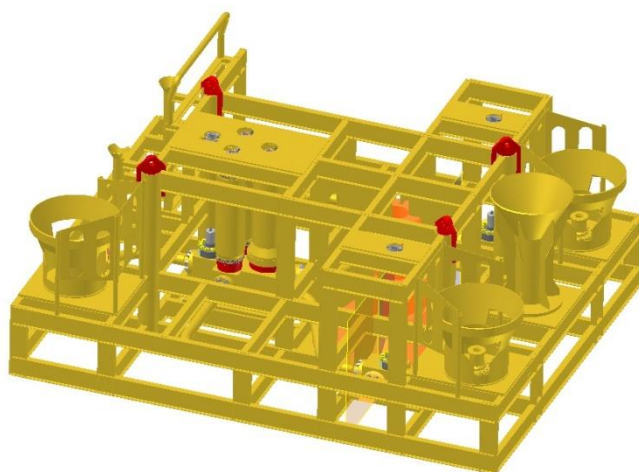


FIGURA 4 - EQUIPAMENTO BASE A PARTIR DO QUAL SE OBTVEU A GEOMETRIA PARA MODELAÇÃO.

Em uma primeira abordagem, a partir do modelo em extensão IGES (*Initial Graphics Extension Specification*) fornecido, decidiu-se pela modelação do equipamento em Elementos Finitos (FEM), no software ANSYS, utilizando estrutura básica definida pela prática de projeto na indústria, sendo todos os elementos componentes do *Manifold*, vigas W 410x46,1, obtidas as características da tabela 1 do anexo B.

Uma vez importado o arquivo, usando a ferramenta de conversão do próprio ANSYS, foi possível começar a tratar o modelo.

Definido o elemento de viga 188 da biblioteca de elementos disponível no software, por ser um elemento de comportamento simplificado porém conhecido, assumiu-se que toda a estrutura estaria se comportando como um conjunto de vigas conectadas entre si e sujeitas às cargas distribuídas ao longo de toda a estrutura.

A viga 188 segue o modelo de tensão-deformação de *Timoshenko* e pode ser linear, como no caso, ou quadrática ou até cúbica, sendo definida por dois nós em ambiente tridimensional. Para cada nó, este elemento permite seis ou sete graus de liberdade, sendo três de translação e três de rotação, nas direções x, y e z, e um sétimo grau de liberdade opcional. Alternativamente, seria possível utilizar também o elemento de viga 189, que apresenta propriedades semelhantes, porém com um nó intermediário. A figura 5 ilustra o esquema do elemento de viga 188. Este ainda apresenta parâmetros de espessura, próprios para análises com grandes deflexões.

Além disso, este elemento suporta tensões tanto no regime elástico como no regime plástico. Sua escolha está atrelada à prática de projeto e às características dos elementos componentes do equipamento, ou seja, vigas de mesma seção.

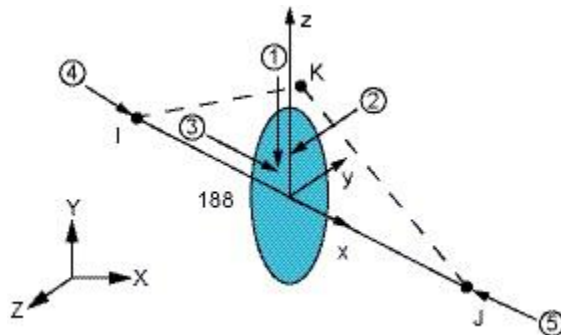


FIGURA 5 - ESQUEMA DO ELEMENTO VIGA188, DO ANSYS

A viga é, por sua vez, criada a partir de um material selecionado, com características de Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson definidos, de modo a integrar as propriedades do material às análises que dependem dessas resoluções.

Para este modelo, como as vigas são produzidas de aço 1020, tem-se que o Módulo de Elasticidade vale 2,1 GPa e o Coeficiente de Poisson, adimensional, vale 0,27.

A partir do material especificado, pode-se então, de fato, compor a viga tal qual a geometria requerida pela prática de projeto, ou seja, comumente utilizam-se vigas do tipo W (ou I) em praticamente todos os elementos componentes.

Definido o tipo de elemento, através da biblioteca de seções típicas do software, pôde-se definir as dimensões principais das seções de viga componentes da primeira iteração do modelo, de acordo com a bitola selecionada a partir da Tabela 1 do anexo B.

Definidas as características básicas componentes do modelo, pôde-se então criar a malha de elementos em si.

2.2. Malha

A malha utilizada deveria ser capaz de traduzir na geometria importada, as características de elemento de viga especificadas e ainda comportar-se como um modelo real, absorvendo o carregamento inserido posteriormente e reagindo de modo coerente. Esta coerência traduz-se na expectativa de se obter reações em todos os modos de operação que se espera que este tipo de equipamento possa estar submetido, incluindo tensões e deformações elásticas. Para tanto, fez-se necessário subdividir cada trecho entre nós do modelo. Aqui, optou-se por dividir cada trecho em dez elementos, de modo a discretizar, em um nível mínimo, o modelo, para evidenciar tensões e deformações. Tal subdivisão poderia variar, assumindo diferentes discretizações para verificar a consistência em comparação à velocidade de processamento do modelo a cada iteração, no entanto este esforço foi aqui suprimido em detrimento da simplificação. Essa discretização é comum a todos os trechos entre nós, independentemente do comprimento considerado, e pode ser visualizada na figura 6.

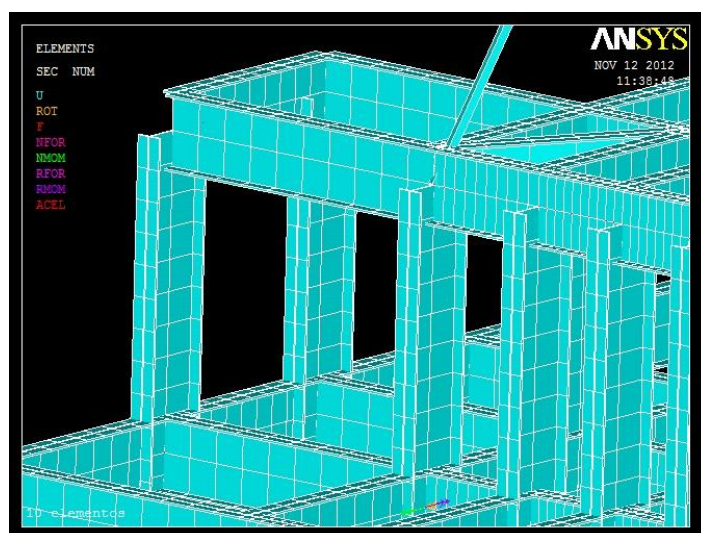


FIGURA 6 - DETALHE DE TRECHO COM MALHA. 10 ELEMENTOS POR TRECHO.

A ligação entre os trechos, nos nós, faz-se automaticamente pela integração do próprio software. No entanto, no momento da criação da malha de elementos, faz-se necessário convergir nós coincidentes, para evitar qualquer ponto de descontinuidade que possa eventualmente impedir que o modelo comporte-se como corpo íntegro.

2.3. Içamento

Como condição básica para iniciar a análise, optou-se pela inserção de condições de contorno referentes à operação de içamento do equipamento, operação esta que promove grandes solicitações e que pode ser considerada como o procedimento de maior carregamento, configurando, portanto, condição crítica.

Uma vez que o *Manifold* possa resistir a essa solicitação e a estrutura apresente peso próprio coerente com as expectativas, então o equipamento passa a ser considerado viável em qualquer outra situação.

Para modelar a condição de içamento, se faz necessário inserir mais um tipo de elemento, LINK180, ilustrado pela figura 7, usual para modelação de cabos, treliças, molas, entre outros elementos esbeltos. Trata-se de um elemento uniaxial de tensão-compressão com três graus de liberdade em cada nó. Define-se comprimento diferente de zero entre dois nós e área transversal do elemento.

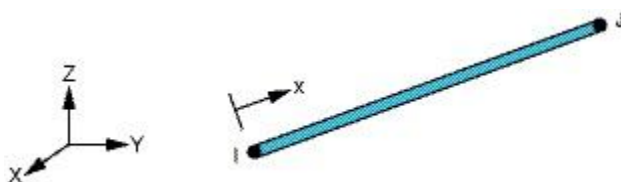


FIGURA 7 - ESQUEMA DO ELEMENTO LINK 180, DO ANSYS.

Neste modelo, não são considerados os olhais de içamento de forma explícita. A conexão da lingada com o equipamento dá-se através de conexão direta entre os elementos LINK 180, pertinente às lingadas, e BEAM188, referente ao equipamento em si, nos pontos de contato, exatamente onde se prevê a posição dos olhais no equipamento real. Esta é uma das formas de simplificar o modelo e trazer o foco para o equipamento, evitando assim concentrações de tensões no que seriam elementos específicos, como olhais de içamento.

As lingadas partem, portanto, uma de cada canto superior do equipamento e as quatro encontram-se à altura especificada pelo ângulo de içamento – de 65 graus em relação ao equipamento – em um único ponto, onde ocorre à ligação entre os elementos de lingada e o equipamento de içamento, este que pode ser um guindaste genérico e que é aqui aproximado por condições de contorno. O ponto de suspensão do equipamento fica então a 5,7 metros acima do topo do equipamento.

Bem como o restante do modelo, foi necessário criar uma malha para que os objetos se comportassem tal qual elementos de lingada. Esta malha, tal qual a malha de elementos componentes do equipamento em si, foi criada de forma a subdividir os intervalos entre nós em dez elementos de lingada, num total de 40 elementos de lingada para todo o *Manifold*.

Para que o modelo seguisse o comportamento esperado para esta condição de içamento, foi também necessário inserir um elemento de massa concentrada no ponto de içamento do guindaste, para que este possa convergir com o modelo. O elemento utilizado para tanto, foi o MASS21, que neste caso exige que a malha abranja apenas o ponto em questão, como elemento.

2.4. Condições de Contorno

Como a análise restringe-se ao comportamento do equipamento apenas, foi necessário criar condições de contorno a partir das quais o *Manifold* se comporte como um corpo íntegro sobre o qual atuassem cargas compatíveis com a realidade do equipamento, bem como as reações pertinentes.

Para tanto, em princípio, criou-se limitações em seis graus de liberdade apenas no nó comum às lingadas, ou seja, no ponto de conexão com o que seria o guindaste de içamento da estrutura. Este tipo de restrição limita os movimentos de translação e rotação em todas as três direções neste ponto, permitindo que o restante dos nós atue de forma integrada, reproduzindo o movimento de um *Manifold* no momento do içamento por um guindaste, sem fundações.

Os pontos de aplicação das restrições foram também posicionados de acordo com a prática de projeto da empresa fornecedora dos *inputs* iniciais, para que, mais uma vez, o modelo fosse modelado de acordo com a realidade de um projeto de equipamento real.

```

|*****
!CONDICAÇÃO DE CONTORNO
|*****

FLST,2,1,3,ORDE,1
FITEM,2,42
/GO
DK,P51X,,,0,ALL,,,,,

FLST,2,1,3,ORDE,1
FITEM,2,12
/GO
DK,P51X,,,0,UX,UY,,,,,

FLST,2,1,3,ORDE,1
FITEM,2,48
/GO
DK,P51X,,,0,UX,,,,,

```

FIGURA 8 – PEÇA DO CÓDIGO INSERIDA NO SOFTWARE

A peça de código vista na figura 8, apresenta a forma como as condições de contorno são inseridas no software. Os comandos podem ser inseridos diretamente através do recurso de leitura de fonte de texto, do próprio software, ou inseridos um a um na barra de comandos, ou ainda, através da interface do usuário.

Trata-se de basicamente três tipos de restrições aplicadas em posições distintas e diametralmente opostas no modelo; uma de engaste total (ALL), no ponto de içamento, ponto 42, como indicado na figura 8, e duas outras, no modelo, com restrição de translação nas direções x e y e apenas em x, pontos 12 e 48, respectivamente.

2.5. Carregamentos

Os carregamentos incidentes nesta condição de operação podem ser resumidos com a inserção do peso próprio do equipamento através da consideração da aceleração da gravidade, aqui considerada como sendo igual a $9,81 \text{ m/s}^2$. A partir da definição da densidade do material usado na composição da malha dos elementos, o programa é capaz de gerar o carregamento do peso atuante na estrutura e que, neste caso, não representa o maior carregamento, crítico, se comparado com o carregamento proveniente da inserção de equipamentos componentes do *Manifold*, como válvulas e sistemas hidráulicos diversos para direcionamento dos fluidos.

No total, a carga nada mais é que o somatório desses pesos (próprio e de equipamentos) atuante diretamente na estrutura e distribuída uniformemente, suspenso, porém, através de somente quatro pontos, que seriam os olhais de içamento.

Além disso, existe um recurso que poderia ser explorado alternativamente, que compete à majoração do valor da densidade em relação ao valor real, passando a apresentar uma diferença de forma a comportar o valor do peso dos equipamentos de válvulas e tubulações que naturalmente elevam o peso computado pelo programa e o aproxima do valor real do equipamento, fazendo deste artifício um meio de tornar as análises mais palpáveis do ponto de vista prático.

Considera-se a inserção do valor da densidade, do material utilizado no equipamento, que é o aço comum, correspondente a $7,85 \text{ ton/m}^3$ em unidades do sistema internacional.

Como já explicado no capítulo que descreve a topologia, o *Manifold* é composto de blocos de diferentes estruturas, que desempenham papéis diferentes em sua função final. Portanto, além do peso do *Manifold*, foram inseridos carregamentos extraídos da prática de projeto da indústria no desenvolvimento de equipamentos similares.

Os carregamentos são inseridos verticalmente apenas, dirigidos para baixo, como resultante da força peso, distribuída idealmente de modo uniforme sobre os elementos de suporte (sobre os nós criados pela discretização dos elementos).

Os valores das forças de corrente e demais aspectos ambientais são desconsiderados nesta análise por configurarem componentes inexpressivas no cálculo das tensões atuantes neste equipamento.

Há, no entanto, que se fazer um esclarecimento em relação à forma como essa questão do peso foi abordada no software, de forma a simplificar o entendimento. As unidades utilizadas, por força do *input* prestado, são imperiais, o que significa que todo o modelo, portanto reforçando, está referenciado para o sistema de unidades que tem a polegada (*in*) como parâmetro de medição. Uma polegada equivale a 0,0254 metros (*m*).

Por conta disso, todas as unidades contempladas no modelo seguem a convenção, como a aceleração da gravidade (in/s^2) e a força, em libras-força (*lbf*). Há, no entanto, que se fazer uma ressalva em relação à unidade de força aqui adotada.

O carregamento inserido está em libras, porém seu valor é inserido no programa através de uma conversão feita no próprio arquivo de *input* e também naturalmente pela análise

conduzida no programa. Portanto, para efeitos práticos, o valor da aceleração da gravidade em unidades imperiais (386 in/s²) não é inserido nem no programa nem no arquivo texto referente à discriminação do carregamento inserido, considerando a gravidade igual a 1 (um), para não gerar redundância no resultado, o que geraria distorções.

A figura 9 mostra como o arquivo de *input* de carregamento é montado.

```

|*****|
|Aceleracao vertical|
|*****|

/SOL
ACEL,0,0,Az*DAF*F1,

```

FIGURA 9 – PARTE DO ARQUIVO DE *INPUT* DE CARREGAMENTO

Percebe-se que ACEL corresponde à aceleração da gravidade, seguida dos valores nas coordenadas em x, y e z da aceleração da gravidade. É importante ressaltar que o parâmetro DAF da figura 9 corresponde ao fator de amplificação dinâmica, no caso unitário, obtido da *Rules for Planning and Execution of Marine Operations* (DNV, 1996).

O que prova, com o desenvolvimento para as unidades imperiais e o desenvolvimento a seguir, o descrito acima.

$$F = \left[lb \cdot \frac{in}{s^2} \right] = [lbf] \rightarrow \text{Força}$$

$$\rho = \left[\frac{kg}{m^3} \right] = \left[\frac{lb}{in^3} \right] \rightarrow \text{Densidade}$$

$$\sigma = \left[\frac{F}{A} \right] = \left[\frac{m \cdot a}{A} \right] \rightarrow \text{Tensão}$$

$$\sigma = \left[\frac{lb \cdot in/s^2}{in^2} \right] = \left[\frac{lbf}{in^2} \right]$$

Enfim, depois de inseridas tanto as restrições quanto a aceleração da gravidade (considerada), pode-se executar a solução do *software*, que nada mais faz que resolver uma análise estática de resistência dos materiais para o corpo discretizado em todos os elementos criados, utilizando a ferramenta oferecida pelo *software*.

Caso o modelo esteja de fato íntegro, ou seja, todos os nós estejam devidamente conectados, a ferramenta será capaz de aplicar formulações básicas de mecânica aos vários elementos do modelo e aplicar o método de superposição para obter um resultado pertinente. Dessa forma, o método dos elementos finitos converge para uma solução, apresentando o resultado em que se baseia todo o desenvolvimento seguinte deste projeto.

Este resultado, por sua vez, pode ser verificado, tal como explicado na continuação deste projeto, como na figura 10, evidenciando as tensões de *von Mises* atuantes em cada trecho, ressaltado por uma escala de cores, da menor para a maior solicitação.

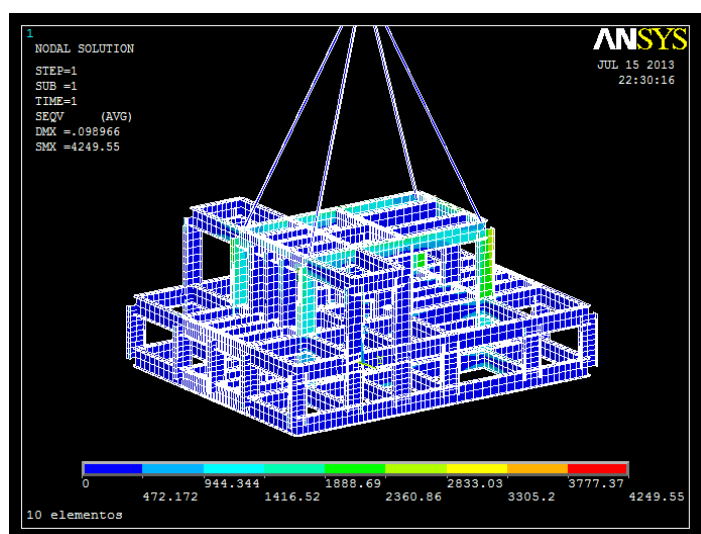


FIGURA 10 - MODELO EVIDENCIANDO A TENSÃO DE VON MISES.

Em seguida, correm as análises de cada caso estudado.

3. Os Métodos LRFD e WSD

3.1. Do Projeto de Estruturas de Aço em Geral

De acordo com o *Steel Construction Manual* (AISC, 2006), o projeto de estruturas em aço, de uma forma geral, deve ser feito de acordo com as disposições para *Load and Resistance Factor Design – LRFD* - (projeto por fator de carregamento e resistência, em tradução livre), ou para *Allowable Strength Design*, ou *Working Stress Design - ASD* ou *WSD* – (projeto por tensão de operação, literalmente), o que, também de acordo com a entidade, são equivalentes e igualmente válidos. Não há preferências nas disposições de

ambos os métodos, porém é comum verificar que algumas companhias da área de projetos de equipamentos de *subsea* adotam esses métodos convenientemente.

É importante atentar para os motivos para os quais ocorrem preferências no uso desses métodos para o dimensionamento das estruturas. Cabe a este trabalho comparar os resultados referentes a cada um dos casos aplicados à mesma estrutura do *Manifold* em questão e levantar algumas hipóteses para esta escolha, senão confirmar a afirmação da AISC em relação à equivalência das técnicas de projeto.

3.2. Da Aplicabilidade

Em ambos os casos, a Tensão Admissível do material deve ser maior que a Tensão Requerida, ou seja, a todo o momento, em todas as partes do equipamento projetado, deve-se garantir que a tensão a que se esteja submetendo a estrutura seja menor que uma tensão segura suficiente para garantir sua integridade de operação.

É importante atentar também para o enfoque dado à parte determinística dos métodos aqui apresentados. Apesar de alguns aspectos exigirem um estudo probabilístico, considerou-se, para efeitos práticos, a aplicação direta dos fatores a que os métodos se referem.

3.3. LRFD

De acordo com *Design of Offshore Steel Structures, General LRFD Method* (DNV, 2011), o método LRFD consiste na obtenção de um valor de segurança razoável através da aplicação de fatores de carregamento e resistência a outros valores de referência. Esses valores de referência, como explicado mais adiante, podem englobar cargas atuando sobre a própria estrutura ou mesmo a resistência dos materiais componentes da estrutura em questão.

Neste método, a solicitação de projeto de cada componente estrutural deve ser igual ou superior à solicitação requerida, determinada de acordo com a combinação de carregamentos compatível com o método em questão. Essa combinação de carregamentos dá-se de acordo com o objetivo da estrutura e é dada por uma superposição de cargas.

O projeto então deve ser dado de acordo com:

$$R_u \leq \phi R_n$$

Onde:

$R_u \rightarrow$ Solicitação Requerida (LRFD);

$R_n \rightarrow$ Solicitação Nominal;

$\phi \rightarrow$ Fator de Resistência;

$\phi R_n \rightarrow$ Solicitação de Projeto.

3.4. WSD

O método é análogo ao LRFD e consideram um mesmo nível de carregamento. As mesmas combinações de carregamento são aplicáveis.

É importante perceber que para este método, no tocante à solicitação de projeto, as forças ou momentos passam a ser o foco, e não as tensões, como no método supracitado, LRFD, apesar de, como explicado mais adiante, aceitar também uma variação de parâmetro para tensões, tal qual o LRFD. Inclusive, a própria regra DNV, referenciada aqui em *Design of Offshore Steel Structures, General WSD Method* (DNV, 2011), apresenta este método como um meio de se obter um componente de segurança para a estrutura através da comparação entre a tensão calculada para diferentes condições de carregamento, com a tensão permissível de carregamento, esta última vinda da multiplicação da capacidade estrutural dos diferentes membros estruturais por fatores de uso.

Nesta metodologia, a solicitação admissível é considerada como solicitação permissível e esta solicitação, por sua vez deve ser maior ou igual à solicitação requerida. De outra forma, explicitando a diferença entre os dois métodos aqui apresentados, tem-se:

$$R_u \leq R_n / \Omega$$

Onde:

$R_u \rightarrow$ Solicitação Requerida (LRFD);

$R_n \rightarrow$ Solicitação Nominal;

$\Omega \rightarrow$ Fator de Segurança;

$R_n / \Omega \rightarrow$ Solicitação de Projeto.

É importante perceber que aqui se faz referência a um fator de segurança (comumente notado como f_s). Esse fator, por sua vez, é obtido através da especificação de um determinado estado-limite que se tenha como fronteira.

3.5. Da Comparação Entre os Métodos

A comparação entre os dois métodos mostra claramente que são muito similares em termos de formulação, apesar de apresentar combinação de cargas e coeficientes diferentes (desconsiderando especificações para requerimentos de estabilidade). No método LRFD as cargas são calculadas utilizando combinações de fatores que dependem da natureza da carga, enquanto que no WSD esses fatores, aqui tratados por coeficientes, são tabelados, com exceção do fator de carga, que é sempre unitário.

Como apresentado por Charles (2013) e pelo *Steel Construction Manual* (AISC, 2006), pode-se usar indiscriminadamente a tensão, força ou momento como parâmetros de formulação e avaliação dos métodos e, apesar de esta análise ater-se ao regime elástico, deve-se saber que as opções metodológicas também são válidas para o regime plástico, utilizando os também possíveis parâmetros de deflexão, fazendo assim com que resultem valores relevantes em ambos os regimes de operação, qualquer que seja a escolha de cálculo adotada.

É imperativo ainda mostrar que um método baseado no princípio do estado limite significa definir fronteiras para a aplicabilidade da estrutura calculada, já que o estado limite é caracterizado, segundo o *Design of Offshore Steel Structures, General LRFD Method* (DNV, 2011), *Design of Offshore Steel Structures, General WSD Method* (DNV, 2011) e *Rules for Planning and Execution of Marine Operations* (DNV, 1996), pela condição além da qual uma estrutura (ou parte dela) excede um determinado requerimento de projeto, no caso, mais comumente, a tensão de escoamento do material (ULS). Isso, em outras palavras, é um princípio intimamente relacionado à capacidade de carga suportada e a segurança oferecida pelo equipamento. Já o estado limite de manutenção diz respeito a valores relacionados ao próprio uso do equipamento sob condições normais de operação e não mais aos extremos de solicitação.

3.6. Estados Limite

Os estados limites considerados neste trabalho são os seguintes:

ULS – Ultimate Limit States

Refere-se à capacidade máxima de carregamento, ponto de escoamento (ou flambagem) do material. Trata-se da tensão máxima de referência a que a tensão admissível se referencia neste trabalho. Além disso, refere-se a este ponto limite como padrão para os cálculos aqui tomados, para considerar o pior dos casos no tocante aos carregamentos incidentes sobre a estrutura.

SLS – Serviceability Limit States

Decorre dos limites provenientes do comportamento da estrutura sob condições específicas de carregamento e operação, sendo exemplos os limites de deflexão, vibração ou relacionados à capacidade humana. No presente trabalho esse estado limite será ignorado em função de ser normalmente menor que o ULS, aqui mais apropriado para avaliação teórica de resistência do equipamento.

Para um projeto bem elaborado, considera-se primordial que a estrutura seja dimensionada proporcionalmente, de modo que nenhuma solicitação admissível ou o estado limite de manutenção seja excedido.

3.7. Carregamentos, Fatores de Carregamentos e Combinação de Carregamentos

Em geral, a solicitação requerida a que a estrutura deve resistir é determinada de acordo com as apropriadas magnitudes de carregamento, fatores de carregamento ou mesmo combinações entre vários carregamentos incidentes. Esses parâmetros, no entanto variam de acordo com a aplicação da estrutura e da área da indústria à qual servirá.

A título de comparação, verifica-se que para a indústria de construção civil, edifícios utilizam de uma normatização básica para o dimensionamento de suas estruturas, já que são submetidos a determinadas combinações de carregamentos discriminadas na chamada *ASCE 7 (American Society of Civil Engineers)*, que uma estrutura de construção civil deve ser calculada para suportar.

Ainda levando em consideração tais diferenças no tocante à indústria para a que se projeta o equipamento, tal qual o equipamento aqui tratado, as condições que devem ser

levadas em conta para a superposição de carregamentos variando drasticamente, passando de condições críticas de ventos e ondas para condições críticas de carregamento de terremotos, por exemplo.

Para o caso descrito neste trabalho, por tratar-se de um equipamento utilizado na indústria *offshore*, deve-se procurar a referência ao dimensionamento dos carregamentos aplicáveis em regras de sociedades classificadoras, que por sua vez, eventualmente, como no caso da regra aqui adotada, discriminam o método utilizado para o cálculo, se LRFD ou WSD, apresentando duas publicações diferentes para tal.

Comumente, no entanto, utiliza-se das regulamentações da API (*American Petroleum Institute*), tanto para LRFD quanto para WSD, para o dimensionamento de equipamentos submersos como o aqui tratado, considerando-o como uma plataforma fixa. No entanto, por motivos práticos e devido à possibilidade de se utilizar das regras oferecidas pela DNV, referências *Design of Offshore Steel Structures, General LRFD Method* (DNV, 2011), *Design of Offshore Steel Structures, General WSD Method* (DNV, 2011) e *Rules for Planning and Execution of Marine Operations* (DNV, 1996), para o cálculo de estruturas *offshore* genéricas, cenário este em que este equipamento enquadra-se, optou-se pela análise utilizando as referências descritas.

Como o objetivo neste projeto é de fato comparar ambas as abordagens, utilizar-se-á aqui ambas as regras, o que na indústria é uma prática não usual, e que justifica-se, porém em termos acadêmicos, apresentando os resultados em momentos distintos e acompanhados de análise posterior.

Além dessa metodologia, faz-se necessário acompanhar algumas especificidades presentes na indústria *offshore*, aplicadas, em sua maioria, aos próprios carregamentos incidentes e que se tornam obrigatórias, porém aparte da escolha entre LRFD ou WSD, apresentadas nesta terceira regra, *Rules for Planning and Execution of Marine Operations* (DNV, 1996), requerida para qualquer projeto de estruturas marítimas, uma vez que, por força de valores relacionados ao mercado de seguros, exige que o nível de segurança seja mais elevado que em outros setores industriais, portanto, agregando mais algumas exigências ao projeto em termos de dimensionamento estrutural de forma geral.

3.8. Consideração Sobre o Projeto

O objetivo deste trabalho não consiste em de fato dimensionar a estrutura, mas sim analisar seu comportamento à luz dos dois métodos aqui apresentados. No entanto, é importante ressaltar que uma vez recebido o *input* do projeto do equipamento em si, agregam-se outros fatores, os quais garantem que a resistência contra deterioração mecânica, física e química; que sua fabricação, em termos topológicos atende às limitações da indústria e às técnicas e práticas usuais de construção; e que são perfeitamente possíveis sua manutenção e reparo eventuais. Essas afirmações se fazem necessárias, uma vez que a aplicação das regras referidas exige que o equipamento assim o seja, bem como garante que a pesquisa aqui desenvolvida tenha embasamento tanto teórico quanto prático.

3.9. Análise Focada no Modelo

A análise focada no modelo visa, principalmente, exprimir em termos práticos a discussão feita acima acerca da metodologia utilizada para os cálculos estruturais. É justamente com esse objetivo que se desenvolve o modelo em elementos finitos do *Manifold* aqui utilizado.

É importante, no entanto, mostrar que o resultado apresentado no modelo considerado, deve ser o valor médio da tensão de *von Mises*, uma vez que, para a modelação, fatores de carenagem e adoçamento, presentes naturalmente no modelo real, são aqui desconsiderados, visto que a importância de tais elementos possivelmente agregaria horas de trabalho dispensáveis à análise do mérito considerado.

Portanto, ao desconsiderar os pontos de solda, principalmente nas quatro regiões de içamento do equipamento, observa-se uma concentração de tensões irreal, como evidenciado na figura 11. São os valores de tensão nessas regiões tão fora da faixa de trabalho do equipamento que ficam evidentes e no quanto são necessárias essas considerações em um projeto real de equipamento, apesar de a indústria conduzir o cálculo estrutural da região de instalação dos pontos de içamento, comumente conhecido por “olhais”, através de cálculos analíticos.

Entretanto, para a avaliação da metodologia, e ainda com a utilização de modelos simplificados de vigas, podem-se fazer tais aproximações, de modo que a diferença entre os valores finais de tensão de comparação de cada método mostra-se diferente em relação ao

outro método. Como se trata do mesmo modelo sob ação dos mesmos carregamentos, então os valores médios podem se confundir no limiar da análise, apresentando resultados muito similares.

A similaridade, como se prova a seguir, pode ser então justificada através da análise dos modelos em viga simples, utilizando seus valores máximos de tensão por não apresentarem uma complexidade estrutural muito grande e facilitarem o entendimento do problema.

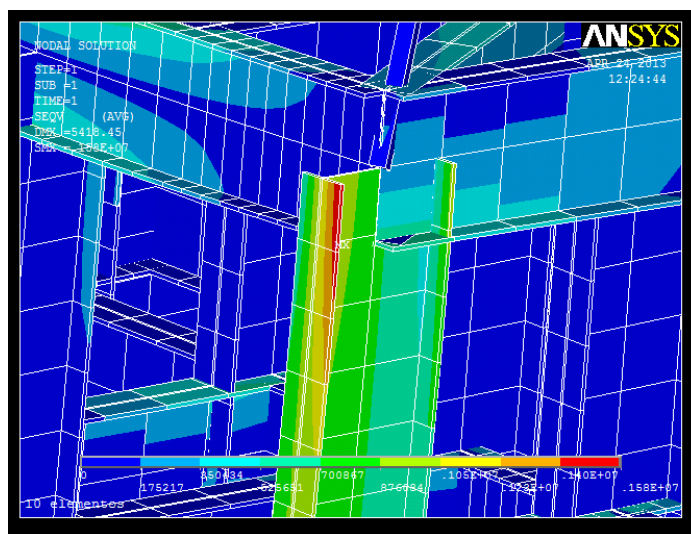


FIGURA 11 - REGIÃO DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO.

Toma-se então a tensão de *von Mises* por parâmetro. O valor máximo de tensão, acusado pelo *software*, atuante na estrutura é usado para avaliar se a estrutura resistirá ou não aos esforços.

Para todos os perfis estruturais experimentados neste *Manifold*, os valores máximos, no entanto, mostraram-se bem abaixo do limite de tensão de escoamento do aço estrutural, variando entre 31 e 27 MPa em pontos críticos da estrutura, como nas posições de içamento, onde a concentração de tensões é máxima.

Para todos os fins, no entanto, a comparação entre os métodos permanece relevante, uma vez que as diferenças evidenciam-se ainda que os valores de tensão não sejam extremos.

A título de comparação, descreve-se a seguir a aplicação de ambos os métodos em vigas biapoiadas.

3.10. Da Teoria de Modelação

Para provar que ambos os métodos podem ser perfeitamente aplicados, desenvolve-se a teoria acima explanada em dois modelos de viga simples biapoiadas, baseados em teoria simples de resistência dos materiais, tal qual apresentado em Beer e Johnston (1995), sob a ação de uma força que, teoricamente, poderia gerar o colapso dessas estruturas. A teoria do experimento é omitida aqui, para efeito de abreviação, porém os resultados estão evidenciados e segregados entre os dois métodos de cálculo da estrutura, para estabelecer uma relação entre eles.

3.10.1. LRFD em Viga Simples Biapoiada

Modelando uma viga simples biapoiada, constituída de um único elemento discreto de 100 metros de comprimento, com uma seção típica de perfil W200x19,3, como vista na tabela 2 do anexo B, sob ação de uma força de 2358,95 *Newtons*, agregada uma margem de 10% de tolerância, a partir de uma tensão máxima de escoamento (de referência) de 250MPa, aplica-se a metodologia de *Low Resistance Factor Design, LRFD*, para verificar como fica o resultado em relação a essa referência, aplicados os devidos coeficientes, na tensão máxima de escoamento, reduzindo-a, e na tensão resultante a partir da força, ampliando-a.

A chamada solicitação de projeto deve ser igual ou superior à solicitação requerida. Esta solicitação, para fins ilustrativos, aqui foi adotada como sendo tensão. A então tensão requerida nada mais é que a tensão de escoamento do material, aço naval, adotada aqui como sendo igual a 250MPa. Já a tensão de projeto, obtida, foi extraída teoricamente através de tratamento matemático, a partir da tensão requerida.

O que se fez foi tomar a formulação de tensão para flexão de viga simples biapoiada e calcular a força referente à tensão requerida, com 10% de redução, para que a tensão não excedesse o limite prático do material, de forma que:

$$\sigma = \frac{M \cdot Y}{I} [N / m^2] \rightarrow \text{Tensão de Flexão};$$

$$M_{flet} = \frac{F \cdot L}{4} \rightarrow \text{Momento Fletor para viga biapoiada e força concentrada a } \frac{L}{2}.$$

Onde o momento fletor é obtido do cálculo direto a partir de uma viga genérica como a exibida na figura 12:

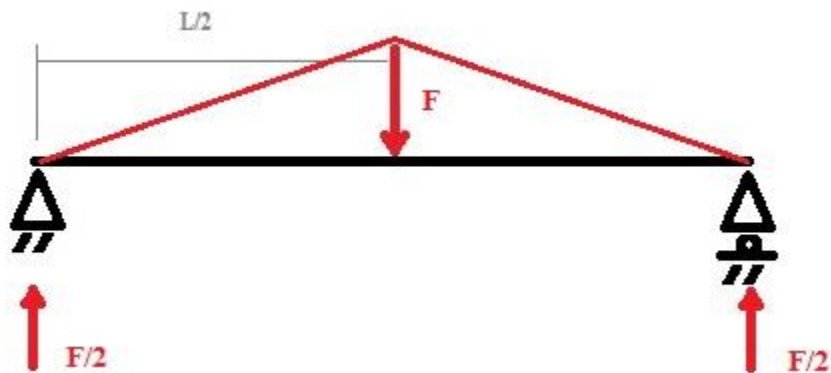


FIGURA 12 - VIGA BIAPOIADA, CARGA CONCENTRADA.

Desenvolvem-se então os cálculos pertinentes, de forma que se obtém, para $x=L/2$, a equação (1):

$$M_{flet} = \frac{F \cdot L}{4} \quad (1)$$

Que há de ser substituído na equação da tensão de flexão (2), de forma que fica:

$$\sigma = \frac{F}{4} \cdot L \cdot \frac{Y}{I} \quad (2)$$

Onde :

$\sigma = 250 \cdot 10^6 \rightarrow$ Tensão de escoamento, requerida, em N/m²;

$L = 100 \rightarrow$ Comprimento da viga exemplo, em metros;

$Y = \frac{h}{2} \rightarrow$ Altura da linha neutra da viga, em metros;

$h = 190 \cdot 10^{-3} \rightarrow$ Altura da viga, em metros;

$I = 2.49 \cdot 10^{-5} \rightarrow$ Momento de inércia da viga, em m⁴;

$F \rightarrow$ Força, variável dependente desejada, em N.

Substituindo os valores na equação (2), resulta:

$$F = 2,62kN$$

A partir deste valor então, deduz-se 10% para a margem anteriormente mencionada, resultado em:

$$F' = 2,36kN$$

Diz-se que S_d é o efeito de carregamento combinado mais desfavorável (R_u), derivado por sua vez dos carregamentos de projeto (F_d). O carregamento de projeto é obtido multiplicando-se o carregamento característico (F_k) por um dado fator de carregamento (γ_f), obtido de acordo com as tabelas 2 e 3 que se seguem e dependente da condição de carregamento (sempre a mais extrema) e estado limite, a saber, como anteriormente explicado, aqui tomado como ULS. Se a relação entre o carregamento e o efeito de carregamento (tal qual neste exemplo) for linear, então este efeito de carregamento de projeto, em unidades de tensão, é calculado multiplicando o efeito de carregamento característico (S_k) pelo fator de carregamento.

TABELA 2 - CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO, REF. TABELA D1, DESIGN OF OFFSHORE STEEL STRUCTURES, GENERAL LRFD METHOD (DNV, 2011)

Table D1 Loading conditions	
<i>Case</i>	<i>Description</i>
<i>a)</i>	functional loads
<i>b)</i>	maximum combination of environmental loads and associated functional loads
<i>c)</i>	accidental loads and associated functional loads
<i>d)</i>	annual most probable value of environmental loads and associated functional loads after credible failures, or after accidental events
<i>e)</i>	annual most probable value of environmental loads and associated functional loads in a heeled condition corresponding to accidental flooding

TABELA 3 - FATORES DE CARREGAMENTO, REF. TABELA D1, DESIGN OF OFFSHORE STEEL STRUCTURES, GENERAL LRFD METHOD (DNV, 2011)

Table D1 Load factors γ_f for ULS				
<i>Combination of design loads</i>	<i>Load categories</i>			
	<i>G</i>	<i>Q</i>	<i>E</i>	<i>D</i>
a)	1.3	1.3	0.7	1.0
b)	1.0	1.0	1.3	1.0

Load categories are:
G = permanent load
Q = variable functional load
E = environmental load
D = deformation load
For description of load categories see Sec.3.

Importante notar que, apesar da nomenclatura e abreviação, trata-se aqui, em termos gerais e para as dadas condições, da obtenção do valor da tensão obtida através da multiplicação do carregamento total pelo fator de carregamento, amplificando-o (em determinado caso) e calculando então a tensão através da formulação para flexão (já apresentada).

$$F_d = \gamma_f \cdot 2358,95 = 2,36kN;$$

$$S_d = f\left(F_{di}; F_{d(i+1)}; F_{d(i+2)}; \dots; F_{dn}\right)$$

$$S_d = \sum_{i=1}^n (\gamma_{fi} \cdot S_{ki})$$

$$M = 59kN.m$$

$$S_d = 225MPa$$

Além disso, a resistência característica, com unidade de tensão aqui também, consiste em nada mais que o limite da combinação de parâmetros de geometria estrutural, propriedades materiais, ambientais e de carregamento que resultam na tensão aqui tratada como requerida ao considerar apenas os parâmetros de propriedades materiais. Este valor, por sua vez, sofre um decréscimo, segundo a regra, ao ser dividido por um fator do material (γ_m), que para o aço corresponde a 1,15 e reduzindo a tensão de escoamento do material para 217,4MPa.

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_m};$$

$$R_d = 217,4MPa$$

Com isso, pode-se então verificar que a comparação passa a ser entre o valor supracitado da tensão requerida e o valor de tensão obtido anteriormente, de forma que:

$$R_d = 217,4MPa$$

$$S_d > R_d \rightarrow \text{NÃO PASSA NO CRITÉRIO!}$$

Sendo, naturalmente, R_d o mesmo que o produto ϕR_n .

É importante ressaltar que apesar de a análise ter demonstrado que a viga não resiste ao carregamento imposto (ao menos através do cálculo feito a partir do método LRFD), esse fato torna-se irrelevante para a finalidade deste trabalho.

Para fins de comparação, ir-se-á efetuar ambos os métodos com os mesmos parâmetros de tensão, apesar de poder haver diferença nessa abordagem, como já dito anteriormente, podendo, qualquer um deles, tratar forças ao invés de tensão.

3.10.2. WSD em Viga Simples Biapoiada

Analogamente ao procedimento descrito anteriormente para a análise utilizando o método LRFD, descreve-se aqui o processo que leva a análise através de elementos finitos de uma viga biapoiada idêntica a anterior, porém agora sob o enfoque do método WSD – *Working Stress Design* para o cálculo da tensão limite e da tensão obtida após a aplicação da mesma força concentrada utilizada no método supracitado.

No método WSD, o nível de segurança é alcançado comparando a tensão (mais uma vez) calculada para diferentes condições de carregamento, com máxima tensão permissível multiplicada por fatores de uso máximo permissível (η_p), como já comentado anteriormente.

Esse fator de uso referencia-se ao valor máximo, obtido através da multiplicação entre o coeficiente dependente do tipo da estrutura (β) pelo fator de uso básico (η_0) da tabela 4, selecionado dependendo das condições de carregamento, explicitadas na tabela a seguir. Utiliza-se aqui, como já mostrado, a condição (b).

TABELA 4 - TABELA DE FATORES DE USO, REF. TABELA E1, DESIGN OF OFFSHORE STEEL STRUCTURES, GENERAL WSD METHOD (DNV, 2011)

Table E1 Basic usage factors η_0					
<i>Loading conditions</i>					
	<i>a)</i>	<i>b)</i>	<i>c)</i>	<i>d)</i>	<i>e)</i>
η_0	0.60 ¹⁾	0.80 ¹⁾	1.00	1.00	1.00
1) For units unmanned during extreme environmental conditions, the usage factor η_0 may be taken as 0.84 for loading condition b).					

Dessa maneira,

$$\eta_p = \beta \cdot \eta_0$$

O resultado do fator de uso máximo permissível, multiplicado então pela tensão de escoamento provoca um efeito de redução (na maioria dos casos), no valor da tensão máxima do material, referenciando então um valor de tensão admissível que não deve, portanto, ser superado pela tensão calculada máxima para garantir a integridade do equipamento.

$$\sigma_{esc} = 250MPa$$

$$\sigma_{adm} = \eta_p \cdot \sigma_{esc}$$

$$\eta_p = 1,0 \cdot 0,8 = 0,8$$

$$\sigma_{adm} = 200MPa$$

Para o exemplo da viga biapoada aqui estudado, sabe-se que o valor da força considerada é o já conhecido do método anterior.

$$F' = 2,36kN$$

Com isso, calcula-se o momento e, por conseguinte, a tensão de flexão relativa a esse carregamento.

$$M = 59kN.m$$

$$\sigma_{calc} = 225MPa$$

Para este caso, tal qual o caso anterior, utilizando o LRFD, o valor da tensão não é satisfatório em termos estruturais e ainda apresenta um valor de tensão admissível reduzido, se comparado com o método anterior, ou seja, trata-se de um resultado inaceitável.

Apesar dos resultados, percebe-se com isso que o método LRFD apresenta uma formulação mais branda, ou menos conservadora, ou cerca de 8% menos rigoroso que quando aplicando o método WSD, ao elevar o valor da tensão admissível neste caso.

4. Otimização

4.1. Conceitos Básicos

Otimizar significa “tornar algo ótimo”, no caso, otimizar um equipamento submarino de modo que atenda às especificações determinadas na etapa de projeto.

Para esta análise, evidentemente, o projeto já está completo. As dimensões atendem a um parâmetro tomado como *input* da indústria e nesta fase, as características desses

parâmetros são enfim comparadas com um novo dimensionamento, resultado de um processo de Otimização Estrutural Dimensional.

No âmbito da otimização estrutural, existem basicamente três abordagens do problema de minimização de uma dada função custo, segundo Cordeiro (2007), e são elas, Otimização Dimensional, Otimização de Forma e Otimização Topológica. Este trabalho atém-se à Otimização Dimensional, uma vez que se deseja manter inalteradas as características básicas topológicas do projeto original de modo que se define a *Otimização Dimensional* como a seguir.

A função custo, na maioria dos casos, é considerada como sendo o peso total da estrutura, podendo acarretar na variação de diversos aspectos da estrutura ao longo do processo de otimização, a depender da abordagem escolhida. Acatando a função peso total como função custo para o problema aqui tratado, explora-se a Otimização Estrutural Dimensional definindo-a como o processo no qual se altera um parâmetro de um dado elemento estrutural, e no caso, por conta de o equipamento ser constituído de vigas, a área da seção desempenha esse papel, ou seja, torna-se variável independente na busca por um peso mínimo da estrutura.

4.2. Considerações do Modelo

Para o modelo de *Manifold* aqui tratado, verificou-se após a análise, que a tensão máxima na estrutura encontra-se em um ponto próximo à posição de içamento. Muito provavelmente, essa condição dá-se pela forma de integração da estrutura neste ponto, que propicia a concentração de tensões, fenômeno este que não se apresenta no equipamento real e que aqui se optou por simplesmente desconsiderar, para efeito de praticidade do projeto, como já explicado na seção 3.9.

4.3. Exemplo Simples

Para efeito de visualização e exemplificação, cabe realizar um processo de otimização em uma viga simples biapoiada em suas extremidades, com uma seção quadrada. O exemplo evidencia também os passos tomados analogamente aos que se seguiram à otimização do *Manifold* em si, estrutura esta bem mais complexa, sob a ótica da mecânica do *software* utilizado, ANSYS 13 e sua interface de otimização estrutural.

Trata-se de um pacote do *software* que nada mais é que uma rotina de programação que adiciona ou retira incrementos de um parâmetro pré-estipulado, para variar algum aspecto a ser otimizado. A partir de uma espécie de um arquivo de registro, um *log* da atividade de modelagem e confecção da malha do objeto inserido, o software identifica a posição deste código em que o incremento deve ser feito e então roda uma nova análise, num processo iterativo de algumas dezenas de ciclos pré-determinados ou até que se alcance um valor estipulado como ótimo para o parâmetro em questão.

A viga do exemplo supracitado é constituída de aço, com uma seção retangular de forma a simplificar a ilustração do método aplicado pelo *software* para otimizar a área de aço em função da tensão.

A seção aqui especificada tem então 20 milímetros de altura (H) e 20 milímetros de largura (W), com um comprimento de 100 metros.

Modelada a viga, constituída por uma linha ligando dois *keypoints* de referência, afastados de 100 metros entre si e “malhada” de acordo com as especificações da seção determinada acima, passa-se então a aplicar a força, de 2000 *Newtons* concentrada a $\frac{3}{4}$ do comprimento total da viga, ou a 75 metros da origem do sistema de coordenadas. Considerando ainda restrições que façam com que esta viga esteja biapoiada, sendo uma restrição de translação em x e uma em y na origem e uma restrição de translação na direção y na extremidade oposta, conduz-se uma análise estática, resultando em uma tensão máxima próximo do ponto de aplicação da força, de 199,9 MPa, como se vê representado na figura 13, o que representa uma folga em relação à tensão máxima de escoamento do material, aqui considerada como sendo de 250 MPa.

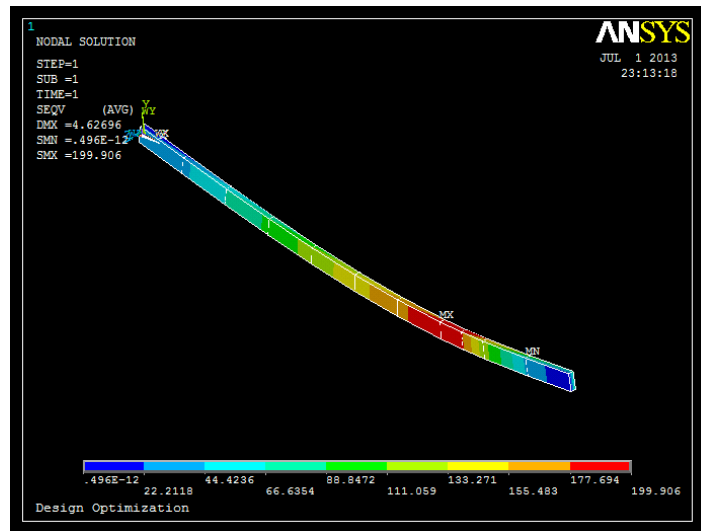


FIGURA 13 - VIGA SIMPLES SOB AÇÃO DE FORÇA CONCENTRADA A 3/4 DE COMPRIMENTO.

No intuito de otimizar a estrutura, ou seja, reduzir o gasto com material e aproximar a tensão máxima do limite de escoamento, propõe-se uma otimização para encontrar a máxima tensão em função da diminuição de volume, estabelecendo H e W como variáveis para tal.

4.3.1. Parametrização

O volume inicial para uma viga com tais dimensões pode ser calculado através da formulação típica do volume de um paralelepípedo comum, fazendo:

$$V_0 = W \cdot H \cdot L = 400000000 \text{ mm}^3 = 0,04 \text{ m}^3$$

O volume passa a ser então, o parâmetro da otimização, demonstrado na figura 14.

```
/POST1
ETABLE,EVolume,VOLU,          ! Volume of single element
SSUM                          ! Sum all volumes
*GET,Volume,SSUM,,ITEM,EVOLUME !Create parameter 'Volume' for volume of
                                beam
```

FIGURA 14 – PEÇA DE CÓDIGO.

Define-se então a tensão máxima aceitável para o fim da otimização, em cada elemento, no nó “i”. Neste caso, assume-se 250MPa, identificada como *SMAX_I*, tomando sempre por referência a tensão de *von Mises*. Este é mais um parâmetro usado no processo, como observado na figura 15.

```

ETABLE, SMAX_I, NMISC, 1                                ! Create parameter 'SMaxI' for max stress
                                                         at I node
ESORT, ETAB, SMAX_I, 0, 1, ,
*GET, SMAXI, SORT, , MAX

```

FIGURA 15 – PEÇA DE CÓDIGO, DEFINIÇÃO DE PARÂMETRO DE TENSÃO MÁXIMA.

Define-se em seguida a tensão máxima aceitável no nó “j” de cada elemento, identificado como *SMAX_J*, como na figura 16.

```

ETABLE, SMAX_J, NMISC, 3                                ! Create parameter 'SMaxJ' for max stress
                                                         at J node
ESORT, ETAB, SMAX_J, 0, 1, ,
*GET, SMAXJ, SORT, , MAX

```

FIGURA 16 – PEÇA DE CÓDIGO, DEFINIÇÃO TENSÃO MÁXIMA NO NÓ J

O valor máximo de tensão pode ocorrer em qualquer ponto do elemento, apesar de assumir-se que na maior parte das vezes a tensão é a mesma em todos os pontos de um mesmo trecho, quando da viga discretizada em diversos elementos.

A figura 17 exhibe o código que atribui à variável *SMAX* o parâmetro de máxima tensão.

```

*SET, SMAX, SMAXI > SMAXJ                                ! Create parameter 'SMax' as max stress

```

FIGURA 17 – PEÇA DE CÓDIGO, DEFINIÇÃO TENSÃO MÁXIMA *SMAX*.

4.3.2. Geração do Loop de Otimização

O processo de otimização em si dá-se, mais especificamente, através de um reprocesso de construção e solução da viga em questão, alterando valores das variáveis (a serem vistas adiante) e recalculando, no caso, a tensão máxima na estrutura, até o valor limite da variável dada como objetivo, restrita pela(s) variável(is) de estado.

Para tanto, o *software* utilizado, *ANSYS 13*, além de todo o pacote de auxílio à otimização, o *Design Opt* oferecido, disponibiliza também um recurso de gravação do procedimento de modelação e solução, como exibido abaixo. Este recurso nada mais é que uma rotina de gravação dos comandos dados ao programa em linguagem própria de programação, em interface de texto sem formatação.

O arquivo gerado, salvo, como mostrado na peça de código da figura 18, pode então ser especificado e recarregado pelo programa de forma iterativa, reconhecendo a(s) variável(is) independentes a serem modificadas e iniciando a otimização de maneira iterativa até que se alcance um resultado convergente no tocante ao limite imposto.

```
LGWRITE,optimize,txt,C:\TEMP          ! Save logfile to C:\Temp\optimize.txt
```

FIGURA 18 – PEÇA DE CÓDIGO, CRIAÇÃO DE ARQUIVO DE LOG.

O arquivo de *log* gerado para este exemplo pode ser encontrado no anexo C deste trabalho.

Somente então é possível iniciar o procedimento de otimização em si, principiando, naturalmente, com o carregamento do arquivo de *log* criado para gerar o processo iterativo. A figura 19 mostra o início deste procedimento.

```
/OPT  
OPANL,'optimize','txt','C:\Temp\'      ! Assign optimize.txt as analysis file
```

FIGURA 19 – PEÇA DE CÓDIGO, INÍCIO DO PROCEDIMENTO DE OTIMIZAÇÃO.

Aqui, como se percebe neste trecho de código, o arquivo de *log* foi nomeado como *optimize.exe* e salvo em um caminho especificado por *C:\Temp*.

4.3.3. Definição de Variáveis e Tolerâncias

Neste passo, definem-se as variáveis críticas para a otimização em si, aquelas que sofrerão alterações pelo programa de modo a alcançarem valores que, juntos, convirjam para o resultado dado como ótimo para os parâmetros supracitados.

Para tanto, é preciso categorizar as variáveis utilizadas, de tal modo que se possa saber quais variáveis têm efeito direto sobre a variável a ser minimizada. Para o caso do exemplo aqui conduzido, a variável a ser minimizada é o volume, que tem relação direta com o peso da estrutura.

São, portanto, três os tipos de variáveis:

Design Variables (DV's): Variáveis independentes que afetam diretamente o resultado do processo. Neste caso, são os valores relativos à altura (H) e à largura (W) da seção da viga, como mostrado na figura 20.

OPVAR,H,DV,10,50,0.001	! Height design variable, min 10 mm, max 50 mm, tolerance 0.001mm
OPVAR,W,DV,10,50,0.001	! Width design variable, min 10 mm, max 50 mm, tolerance 0.001mm

FIGURA 20 – PEÇA DE CÓDIGO, DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES.

A tolerância se faz necessária, já que a iteratividade requer uma especificação para o afastamento máximo a que se pode considerar de um valor de convergência, por conta dos erros considerados pela própria natureza do processo. Além disso, é através das tolerâncias que se pode ter uma ideia da sensibilidade da variável às mudanças impostas, nos resultados contínuos.

State Variables (SV's): São variáveis dependentes diretamente da variação das variáveis independentes. São importantes para dar restrições ao resultado, tal como a tensão máxima na viga. A figura 21 mostra a definição destas variáveis.

OPVAR,SMAX,SV,195,200,0.001	! Height state variable, min 195 MPa, max 200MPa,tolerance 0.001 MPa
-----------------------------	--

FIGURA 21 – PEÇA DE CÓDIGO, DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DEPENDENTES.

Objective Variables (OV's): Trata-se justamente da variável a ser minimizada. É exatamente sobre ela em que se aplica o processo de otimização e em que o resultado é avaliado. Aqui, esta variável, apresentada na figura 22, é tomada como o volume da viga.

OPVAR,VOLUME,OBJ,,,200	! Volume as object variable, tolerance 200 mm^2
------------------------	---

FIGURA 22 – PEÇA DE CÓDIGO, DEFINIÇÃO DA VARIÁVEL OBJETIVO.

4.3.4. Definição do Método de Otimização

O método deve então ser especificado. É evidente que, dentre todos os métodos de otimização existentes, considera-se aqui àquele que se refere, como já explicitado, à Otimização Dimensional.

Mas, além desse aspecto, deve-se garantir que não se esteja buscando a solução de um mínimo local, porém global. Para isso, é de vital importância selecionar um método, dentre os disponíveis no universo de possibilidades para Otimizações Dimensionais, que seja comprometido com esse valor de busca pelo ótimo global, como é o caso do método aqui utilizado, chamado de *First-Order Solution Method* (Método de Solução de Primeira Ordem, em tradução literal), que nada mais é que um método numérico que descreve a evolução de uma variável em função do tempo, a partir de condições iniciais de contorno conhecidas, ou seja:

$$y' = f(t, y) \quad \therefore y(t_0) = y_0$$

A figura 23 mostra essas definições.

```
OPTYPE,FIRS                                ! First-order analysis
OPFRST,30,100,0.2,                          ! Max iteration, Percent step size,
                                           Percent forward difference
```

FIGURA 23 – PEÇA DE CÓDIGO, DEFINIÇÃO DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO.

É neste contexto que se deve determinar, portanto, o número máximo de iterações e o percentual de incremento (decremento) sobre as variáveis livres, bem como o percentual de variação gradiente.

A partir de então, definidos todos os parâmetros, variáveis e rotina de iteração, executa-se a otimização em si, como mostrado na figura 24.

```
OPEXE                                       ! Run optimization
```

FIGURA 24 – PEÇA DE CÓDIGO, EXECUÇÃO DA OTIMIZAÇÃO.

4.3.5. Resultados do Exemplo Proposto

Os resultados, apresentados em forma gráfica evidenciam o comportamento das variáveis independentes ao longo do processo de minimização do volume de forma iterativa.

Após cerca de 30 iterações, verificou-se um aumento na dimensão de altura (H) da viga, enquanto que a largura (W) sofreu uma redução comparativa, como se observa no gráfico gerado (figura 25):

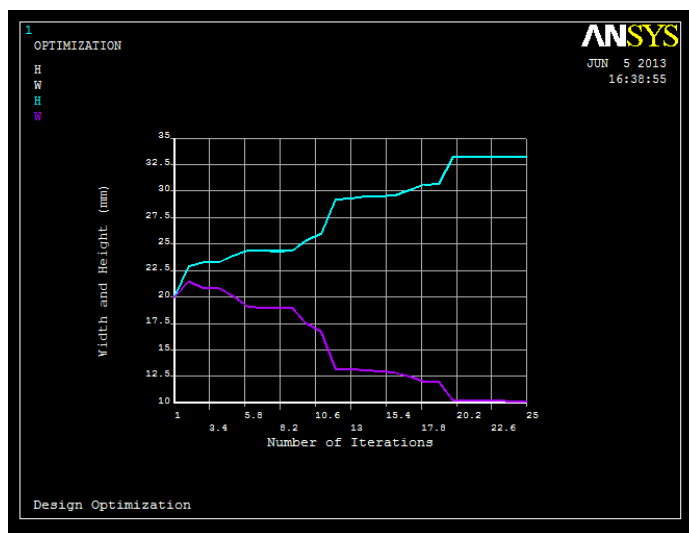


FIGURA 25 - RESULTADO DA OTIMIZAÇÃO EXEMPLO

Em termos numéricos, a viga, que inicialmente possuía 40000mm^3 de volume, passou a apresentar 38610mm^3 com uma tensão de 199,83MPa e largura de 13,24mm e altura de 29,16mm.

5. Resultados

Os resultados aqui apresentados são pertinentes às análises do modelo de *Manifold* estudado sob o enfoque, primeiramente, dos métodos de cálculo estrutural apresentados, LRFD e WSD. Por consequência da análise inicial efetuada para a tensão no equipamento, no entanto, verificou-se a impossibilidade da aplicação desses métodos, como avaliações, pelo grande superdimensionamento verificado por conta da seção indicada.

Seguiu-se tal qual o fluxo deste trabalho, um processo de otimização desta estrutura, de modo a permitir que a análise através dos métodos propostos mostrasse resultados mais

relevantes do ponto de vista de projeto, como assim foi para a comparação entre os resultados das vigas tomadas como exemplo.

No entanto, após um aprofundado estudo dos recursos disponíveis para a otimização, como apresentado no capítulo quatro (4), verificou-se que o esforço para se alcançar um resultado de otimização para equipamento com tal nível de complexidade inviabilizaria a conclusão deste trabalho. Este panorama criou a possibilidade de esta mesma otimização ser conduzida manualmente ao invés do uso de recurso específico do programa de Elementos Finitos, baseando a análise nos conceitos da larga teoria de otimização conhecida e aqui brevemente apresentada.

Propôs-se, portanto, a redução gradual da seção da viga utilizada para a análise (sempre uniformemente em toda a estrutura), de forma a aumentar a tensão máxima atuante.

5.1. Primeira Iteração

Iniciando com a modelação usando vigas W410x46,1, reduziu-se a seção para elementos W200x15, mostrado na figura 26. Este elemento configura redução de 67,5% na massa linear da viga.

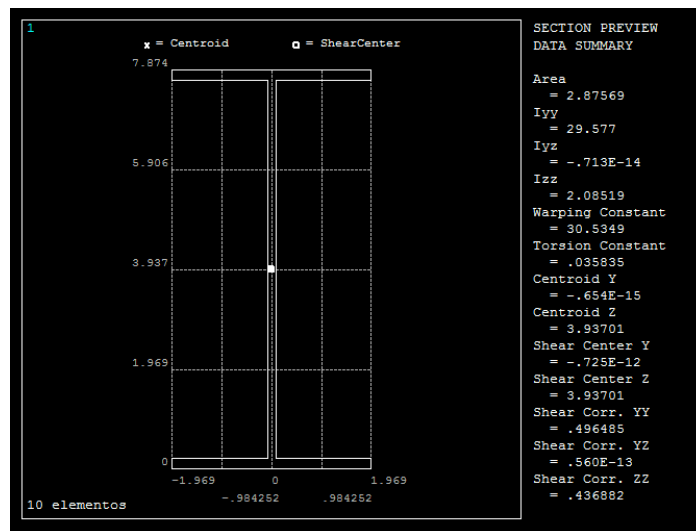


FIGURA 26 - VIGA W200X15 E PROPRIEDADES.

Aplicando a alteração na linha de código diretamente, como na figura 27, tem-se:

```
/prep7  
SECDATA,100/25.4,100/25.4,200/25.4,5.2/25.4,5.2/25.4,4.3/25.4,0,0,0,0,0
```

FIGURA 27 – PEÇA DE CÓDIGO, APLICAÇÃO DA ALTERAÇÃO DE SEÇÃO.

Com isso, a tensão original na viga W410x46,1, com 46,1Kg/m de densidade linear, que era de, no máximo de 31MPa, aumenta para 115,046MPa com a utilização dessa nova viga, com tensões de *von Mises* representadas na figura 28, o que faz o peso total do equipamento cair para 9928,1lb ou 4,5 toneladas, aproximadamente.

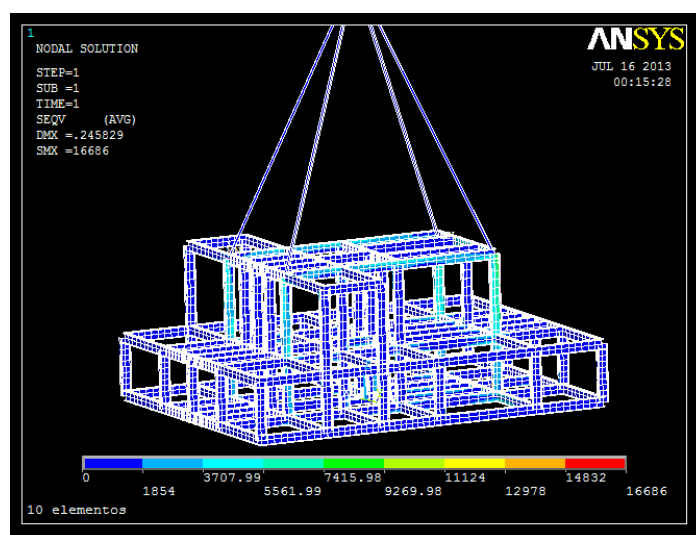


FIGURA 28 - RESULTADO DA ANÁLISE COM A VIGA REDUZIDA.

No entanto, ainda não configura limite de utilização do equipamento, uma vez que se assume o valor de 250MPa como tensão de escoamento desse material.

5.2. Segunda Iteração

Na tentativa de se chegar ainda mais próximo do limite de escoamento do material, reduz-se mais uma vez a viga utilizada, dessa vez adotando a viga W150x13 para a modelação.

Aplica-se mais uma vez a linha de código que modifica a propriedade da seção no *software*, como observado na figura 29:

FIGURA 29 – PEÇA DE CÓDIGO, SEGUNDA ALTERAÇÃO NA SEÇÃO DA VIGA.

Verifica-se desta vez que o peso total do equipamento cai para meros 8236,9lb ou 3,7 toneladas, aproximadamente. A tensão, por sua vez, aumenta para cerca de 175,065 MPa, o que já caracteriza um estado crítico, próximo a 200MPa.

5.3. Validação do Modelo e Aplicação dos Métodos LRFD e WSD

Com a significativa redução percentual do peso e do aumento da tensão máxima encontrada no resultado da segunda iteração, deve-se, em geral, inicialmente conduzir uma análise de flambagem de forma a garantir que tal redução no perfil utilizado é factível em termos práticos. No entanto, pelo pequeno porte do equipamento e suas baixa complexidade construtiva, e ainda como as análises aqui realizadas já levaram em consideração cargas combinadas, se considera a não ocorrência de flambagem em nenhum trecho do equipamento, o que então viabiliza a aplicação da teoria apresentada anteriormente acerca dos métodos LRFD e WSD, para verificação (e não projeto) das tensões atuantes sobre a estrutura do *Manifold*.

5.3.1. LRFD

Segundo o método apresentado, a partir de uma tensão de 250MPa, aplicando a ela o fator do material correspondendo a 1.15, de acordo com a formulação já apresentada em 3.10.1, resultam numa tensão permissível de 217,4MPa, enquanto deve-se considerar a tensão máxima obtida multiplicada por um fator neste caso unitário que não altera seu valor.

Portanto, sob o enfoque do método LRFD, o *Manifold* projetado com viga de seção W150x13 ainda passa no critério de regra, de forma que:

$$R_d = 217,4MPa$$

$$S_d < R_d \rightarrow \text{PASSA NO CRITÉRIO!}$$

5.3.2. WSD

Em uma nova análise, desta vez conduzida sob o enfoque do método WSD apresentado em 3.10.2, o valor da tensão admissível deve cair em 20%, resultando em 200MPa, por conta da aplicação de fatores de uso, como convenientemente apresentado.

A tensão obtida, tal qual em LRFD, não sofre alteração comparativa, permanecendo o valor de 175MPa, o que faz com que o resultado seja similar à análise anterior, ou seja,

$$\sigma_{adm} = 200MPa$$

$$\sigma_{adm} > \sigma_{calc} \rightarrow \text{PASSA NO CRITÉRIO!}$$

5.3.3. Da Comparação

Vê-se, mais enfaticamente neste caso, que a diferença entre os métodos de cálculo é mínima, de modo que apresenta-se apenas uma variação da ordem de 8%, tal qual averiguado anteriormente, dada a diferença entre as tensões admissíveis comparadas.

6. Conclusão

A pesquisa entre os métodos de cálculo aqui apresentados certamente não configura nenhum acréscimo em termos mercadológicos, no entanto, em termos acadêmicos representa uma comparação de importante valia, no tocante a diferenciação na escolha da abordagem. Apesar de os resultados diferirem de apenas cerca de 8%, percebe-se que a escolha está atrelada não apenas ao resultado, mas à facilidade de aplicação e nos diferentes modos de raciocínio, sendo que um deles salienta melhor o enfoque da tensão (WSD) e outro expõe com maior clareza a resistência a que o equipamento deverá ser projetado (LRFD). Ambos são métodos ainda em uso na indústria, porém já é sabido que há uma preferência pelo LRFD, pela abrangência de métodos construtivos embutida na fatoração das cargas e solicitações, o que permite maiores variações neste aspecto. Além disso, não sendo mais o aço o único material na indústria, o WSD passa a não cobrir todas essas novas possibilidades construtivas, no tocante a abrangência dos métodos de uma forma bem mais geral que aquela apresentada neste trabalho, contribuindo apenas para apreciação final. Ainda assim, apesar de hoje haver uma livre movimentação entre os métodos e esta clara preferência entre sua utilização, com autores tratando o WSD como método em vias de

perder sua adequabilidade, historicamente percebe-se a diferença metodológica que levou a criação dos mesmos, o que também se torna importante fator na formação crítica do engenheiro.

É importante ressaltar também a importância deste trabalho para o entendimento de procedimentos não necessariamente, ou superficialmente, cobertos pela ementa oferecida ao longo do curso de Bacharel em Engenharia Naval e Oceânica na Universidade Federal do Rio de Janeiro, principalmente no tocante à área de estruturas *offshore*, que representa hoje um crescente interesse do mercado. Tanto para a escolha entre métodos de cálculo como para a opção posterior por uma análise de otimização, a expansão do horizonte analítico configura incremento fundamental na forma de construção do raciocínio, em termos de economia de material, redução de custos e, enfim, maiores ganhos com o aumento da eficiência de um projeto, seja ele de um equipamento como o aqui apresentado ou de uma embarcação ou plataforma flutuante, escopo claro das funções de um profissional com a formação almejada.

7. Referências Bibliográficas

- BEER, F.P., JOHNSTON JR., E.R., 1995, “*Resistência dos Materiais*” – 3 ed., São Paulo: Pearson Makron Books.
- CHARLES, J.C., *The Better (Not Bitter) Truth*. [S.I.]: Penn State College of Engineering. Disponível em: <<http://www.engr.psu.edu/ae/steelstuff/lrfd.htm>>, Acesso em: 27 Jul. 2013, 15:45:00.
- CORDEIRO, M.F., 2007, “*Uma Técnica para Otimização Estrutural Mediante a Derivada Topológica*”. M.Sc. Dissertação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- *Design of Offshore Steel Structures, General (LRFD Method)*, DET NORSKE VERITAS, 2011.
- *Design of Offshore Steel Structures, General (WSD Method)*, DET NORSKE VERITAS, 2011.
- HUTTON, D.V., 2004, “*Fundamentals of Finite Element Analysis*”, 1 ed., New York: McGraw-Hill Higher Education.
- HAGHIHI, M., HAWBOLDT, K. A., CAI, J., 2013, “*Hydrate Prevention in Subsea Oil Production Dead-Legs*”. In: 2013 Offshore Technology Conference, May 06 - 09, 2013 2013, Houston, TX, USA.
- LAI, H.S., 2009, “*Análise Estática de Fundação Rasa Em Argila Para Manifolds Submarinos*”. M.Sc. Dissertação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- RIBEIRO, M.L., 2008, “*Concepção de Manifolds Submarinos para Lançamento Pendular em Águas Ultra Profundas*”. D.Sc. Tese, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- *Rules for Planning and Execution of Marine Operations*, Part 1, Chapter 4, Det Norske Veritas, 1996.
- *Steel Construction Manual (13th Ed.)*, AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION, 2006.

Anexos

Anexo A - Arquivo Input de Carregamento

```
/SOLU
!DAF=1.75
!F1=1.5
!F2=1.3
DAF=1
F1=1
F2=1
```

```
Az=1 !in/s2
```

```
BPD=17480    !!b
BVBP2=2838   !!b
BVBP3=2838   !!b
PROV=2205    !!b
SCM=9480     !!b
TORP=16901   !!b
```

```
!*****
!BLOCO PIG DIVERT
!*****
```

```
FLST,2,36,1,ORDE,10
FITEM,2,4418
FITEM,2,-4426
FITEM,2,4148
FITEM,2,3741
FITEM,2,3864
FITEM,2,-3873
FITEM,2,4798
FITEM,2,-4806
FITEM,2,4207
FITEM,2,-4216
/GO
F,P51X,FZ,-(BPD*DAF*F2*Az)/36
```

```
!*****
!BLOCO VBP2 + PT
!*****
```

```
FLST,2,16,1,ORDE,4
FITEM,2,3907
FITEM,2,-3915
FITEM,2,3825
FITEM,2,-3833
/GO
F,P51X,FZ,-(BVBP2*DAF*F2*Az)/16
```

```
!*****
!BLOCO VBP3 + PT
!*****
```

```
FLST,2,16,1,ORDE,4
FITEM,2,3763
FITEM,2,-3771
FITEM,2,3886
FITEM,2,-3894
/GO
F,P51X,FZ,-(BVBP3*DAF*F2*Az)/16
```

```
!*****
!PAINEL ROV
!*****
```

```
FLST,2,268,1,ORDE,79
FITEM,2,2326
FITEM,2,-2334
FITEM,2,306
FITEM,2,404
FITEM,2,-412
FITEM,2,2024
FITEM,2,-2031
FITEM,2,266
FITEM,2,286
FITEM,2,207
FITEM,2,499
FITEM,2,-507
FITEM,2,2288
FITEM,2,-2296
FITEM,2,613
FITEM,2,-621
FITEM,2,86
FITEM,2,632
FITEM,2,-640
```

```

FITEM,2,166
FITEM,2,2117
FITEM,2,-2125
FITEM,2,85
FITEM,2,537
FITEM,2,-545
FITEM,2,346
FITEM,2,2383
FITEM,2,-2391
FITEM,2,2004
FITEM,2,-2022
FITEM,2,2032
FITEM,2,-2040
FITEM,2,106
FITEM,2,2231
FITEM,2,-2239
FITEM,2,556
FITEM,2,-564
FITEM,2,227
FITEM,2,2269
FITEM,2,-2277
FITEM,2,423
FITEM,2,-431
FITEM,2,326
FITEM,2,2364
FITEM,2,-2372
FITEM,2,2307
FITEM,2,-2315
FITEM,2,44
FITEM,2,480
FITEM,2,-488
FITEM,2,64
FITEM,2,2136
FITEM,2,-2144
FITEM,2,23
FITEM,2,2250
FITEM,2,-2258
FITEM,2,518
FITEM,2,-526
FITEM,2,2
FITEM,2,2345
FITEM,2,-2353
FITEM,2,1
FITEM,2,2041
FITEM,2,-2049
FITEM,2,22
FITEM,2,594
FITEM,2,-602
FITEM,2,65
FITEM,2,575
FITEM,2,-583
FITEM,2,2098
FITEM,2,-2106
FITEM,2,2060
FITEM,2,-2068
FITEM,2,2079
FITEM,2,-2087
FITEM,2,43
FITEM,2,385
FITEM,2,-393
/GO
F,P51X,FZ,-(PROV*DAF*F2*Az)/268

```

```

|*****
!SCM
|*****

FLST,2,37,1,ORDE,10
FITEM,2,3222
FITEM,2,-3229
FITEM,2,3526
FITEM,2,-3533
FITEM,2,3241
FITEM,2,-3248
FITEM,2,3469
FITEM,2,-3477
FITEM,2,3412
FITEM,2,-3420
/GO
F,P51X,FZ,-(SCM*DAF*F2*Az)/37

```

```

|*****
!ESTRUTURA INTERFACE TORPEDO
|*****

FLST,2,108,1,ORDE,30
FITEM,2,3947
FITEM,2,4128
FITEM,2,-4137
FITEM,2,4227
FITEM,2,-4235
FITEM,2,4207
FITEM,2,-4216
FITEM,2,4148
FITEM,2,-4157
FITEM,2,3927
FITEM,2,4741
FITEM,2,-4749
FITEM,2,3885
FITEM,2,4760
FITEM,2,-4768
FITEM,2,3761
FITEM,2,4108
FITEM,2,-4117
FITEM,2,4188
FITEM,2,-4196
FITEM,2,4168
FITEM,2,-4177
FITEM,2,3844
FITEM,2,-3853
FITEM,2,3823
FITEM,2,4627
FITEM,2,-4635
FITEM,2,3906
FITEM,2,4646
FITEM,2,-4654
/GO
F,P51X,FZ,-(TORP*DAF*F2*Az)/108

```

Anexo B – Tabela de Bitolas

Tabela 1 - Tabela de Bitolas, Viga I

BITOLA mm x kg/m	Massa Linear kg/m	d mm	b ₁ mm	ESPESSURA		h mm	d' mm	Área cm²	EIXO X - X				EIXO Y - Y				r _x cm	I _x cm⁴	ESBELTEZ		C _x cm²	u m²/m	BITOLA mm x kg/m
				t _w mm	t _f mm				I _x cm⁴	W _x cm³	r _x cm	Z _x cm³	I _y cm⁴	W _y cm³	r _y cm	Z _y cm³			ABA - λ _y b ₁ /2t _f	ALMA - λ _x d'/t _w			
W 360 x 91,0 (H)	91,0	353	254	9,5	16,4	320	288	115,9	26.755	1.515,9	15,19	1.680,1	4.483	353,0	6,22	538,1	6,90	92,61	7,74	30,34	1.268.709	1,68	W 360 x 91,0 (H)
W 360 x 101,0 (H)	101,0	357	255	10,5	18,3	320	286	129,5	30.279	1.696,3	15,29	1.888,9	5.063	397,1	6,25	606,1	6,93	128,47	6,97	27,28	1.450.410	1,68	W 360 x 101,0 (H)
W 360 x 110,0 (H)	110,0	360	256	11,4	19,9	320	288	140,6	33.155	1.841,9	15,36	2.059,3	5.570	435,2	6,29	664,5	6,96	161,90	6,43	25,28	1.609.070	1,69	W 360 x 110,0 (H)
W 360 x 122,0 (H)	122,0	363	257	13,0	21,7	320	288	155,3	36.599	2.016,5	15,35	2.269,8	6.147	478,4	6,29	732,4	6,98	212,70	5,92	22,12	1.787.806	1,70	W 360 x 122,0 (H)
W 410 x 38,8	38,8	399	140	6,4	8,8	381	357	50,3	12.777	640,5	15,94	736,8	404	57,7	2,83	90,9	3,49	11,69	7,95	55,84	153.190	1,32	W 410 x 38,8
W 410 x 46,1	46,1	403	140	7,0	11,2	381	357	59,2	15.690	778,7	16,27	891,1	514	73,4	2,95	115,2	3,55	20,06	6,25	50,94	196.571	1,33	W 410 x 46,1
W 410 x 53,0	53,0	403	177	7,5	10,9	381	357	68,4	18.734	929,7	16,55	1.052,2	1.009	114,0	3,84	176,9	4,56	23,38	8,12	47,63	387.194	1,48	W 410 x 53,0
W 410 x 60,0	60,0	407	178	7,7	12,8	381	357	76,2	21.707	1.066,7	16,88	1.201,5	1.205	135,4	3,98	209,2	4,65	33,78	6,95	46,42	467.404	1,49	W 410 x 60,0
W 410 x 67,0	67,0	410	179	8,8	14,4	381	357	86,3	24.678	1.203,8	16,91	1.362,7	1.379	154,1	4,00	239,0	4,67	48,11	6,22	40,59	538.546	1,50	W 410 x 67,0

Tabela 2 – Tabela de Bitolas, perfis reduzidos.

BITOLA mm x kg/m	Massa Linear kg/m	d mm	b ₁ mm	ESPESSURA		h mm	d' mm	Área cm²	EIXO X - X				EIXO Y - Y				r _x cm	I _x cm⁴	ESBELTEZ		C _x cm²	u m²/m	BITOLA mm x kg/m
				t _w mm	t _f mm				I _x cm⁴	W _x cm³	r _x cm	Z _x cm³	I _y cm⁴	W _y cm³	r _y cm	Z _y cm³			ABA - λ _y b ₁ /2t _f	ALMA - λ _x d'/t _w			
W 150 x 13,0	13,0	148	100	4,3	4,9	138	118	16,6	635	85,8	6,18	96,4	82	16,4	2,22	25,5	2,60	1,72	10,20	27,49	4.181	0,67	W 150 x 13,0
W 150 x 18,0	18,0	153	102	5,8	7,1	139	119	23,4	939	122,8	6,34	139,4	126	24,7	2,32	38,5	2,69	4,34	7,18	20,48	6.683	0,69	W 150 x 18,0
W 150 x 22,5 (H)	22,5	152	152	5,8	6,6	139	119	29,0	1.229	161,7	6,51	179,6	387	50,9	3,65	77,9	4,10	4,75	11,52	20,48	20.417	0,88	W 150 x 22,5 (H)
W 150 x 24,0	24,0	160	102	6,6	10,3	139	115	31,5	1.384	173,0	6,63	197,6	183	35,9	2,41	55,8	2,73	11,08	4,95	17,48	10.206	0,69	W 150 x 24,0
W 150 x 29,8 (H)	29,8	157	153	6,6	9,3	138	118	38,5	1.739	221,5	6,72	247,5	556	72,6	3,80	110,8	4,18	10,95	8,23	17,94	30.277	0,90	W 150 x 29,8 (H)
W 150 x 37,1 (H)	37,1	162	154	8,1	11,6	139	119	47,8	2.244	277,0	6,85	313,5	707	91,8	3,84	140,4	4,22	20,58	6,64	14,67	39.930	0,91	W 150 x 37,1 (H)
W 200 x 15,0	15,0	200	100	4,3	5,2	190	170	19,4	1.305	130,5	8,20	147,9	87	17,4	2,12	27,3	2,55	2,05	9,62	39,44	8.222	0,77	W 200 x 15,0
W 200 x 19,3	19,3	203	102	5,8	6,5	190	170	25,1	1.686	166,1	8,19	190,6	116	22,7	2,14	35,9	2,59	4,02	7,85	29,31	11.098	0,79	W 200 x 19,3

Anexo C - Arquivo log para o loop de Otimização:

```
/BATCH
/COM,ANSYS RELEASE 13.0  UP20101012   16:20:43  06/05/2013
/input,menust,tmp,",,,,,,,,,,,,,1
/GRA,POWER
/GST,ON
/PLO,INFO,3
/GRO,CURL,ON
/CPLANE,1
/REPLOT,RESIZE
WPSTYLE,,,,,,,,,0
/REPLOT,RESIZE
/prep7
/title, Design Optimization
/DIST,1,1.08222638492,1
/REP,FAST
/DIST,1,0.924021086472,1
/REP,FAST
*set,H,20
*set,W,20
K,1,0,0
K,2,1000,0
L,1,2
HPTCREATE,LINE,1,0,RATI,75,
ET,1,BEAM3
R,1,W*H,(W*H**3)/12,H,,,,
MP,EX,1,200000
MP,PRXY,1,0.3
ESIZE,100
LMESH,ALL
FINISH
/SOLU
ANTYPE,0
DK,1,UX,0
DK,1,UY,0
DK,2,UY,0
FK,3,FY,-2000
SOLVE
FINISH
/POST1
ETABLE,EVolume,VOLU,
SSUM
*GET,Volume,SSUM,,ITEM,EVOLUME
ETABLE,SMAX_I,NMISC,1
ESORT,ETAB,SMAX_I,0,1,,
*GET,SMAXI,SORT,,MAX
ETABLE,SMAX_J,NMISC,3
ESORT,ETAB,SMAX_J,0,1,,
*GET,SMAXJ,SORT,,MAX
*SET,SMAX,SMAXI>SMAXJ
! LGWRITE,optimize,txt,C:\TEMP
```